

Mejoras en la predicción del oleaje costero utilizando vientos de muy alta resolución

Treball realitzat per:

Carlos Cortijo Yarza

Dirigit per:

Manuel Espino Infantes

Albert Soret Miravet

Carles Tena Medina

Elena Pallarés Lopez

Màster en:

Enginyeria de Camins, Canals i Ports

Barcelona, 14 de Juny de 2017

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Agraïments

Voldria agrair a *Puertos del Estado* per facilitar les dades de les boies, sense les quals no hagués estat possible aquest estudi.

També voldria agrair a la *Agencia Estatal de Meteorología* (AEMET) i al Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) per les dades meteorològiques de que disposen, així com el servei públic que realitzen.

Voldria donar un especial agraïment al *Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS), en particular als *Earth Sciences i Computational Earth Sciences Groups*, per posar el *MareNostrum* a la disposició dels càlculs meteorològics d'aquesta tesina.

També voldria agrair als serveis tècnics de l'Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona (Caminstech) per la possibilitat de realitzar els càlculs d'onatge en el *Titani*, així com l'assistència donada.

Voldria donar el meu sincer agraïment al meu tutor, Manuel Espino, i als meus cotutors, Albert Soret, Carles Tena i Elena Pallarés, per la dedicació, paciència i amabilitat donats durant aquests llargs mesos de feina, així com la guia i capacitat de transmetre els coneixements.

També agrair a amics i familiars per l'interès i preocupació que han mantingut tot aquest temps. I sobretot, agrair amb molt afecte als meus pares i la meva parella per la paciència, estima i comprensió al llarg d'aquest durs mesos de feina.

Resum

Els fenòmens meteorològics extrems, com les tempestes, generen afectacions socioeconòmiques addicionals en les zones costaneres, ja que en elles s'hi desenvolupen diverses activitats d'oci i de gran impacte econòmic.

No obstant, les resolucions dels productes generats pels models globals (de l'ordre d'uns 50x50 km) són massa baixes per a usos en zones costaneres, degut a la major variabilitat orogràfica d'aquestes, provocant prediccions esbiaixades o imprecises dels models d'onatge o dels models oceànics. Per tal d'adaptar-se a aquesta complexitat és necessari anidar-se en els models globals per a augmentar la resolució dels dominis i les dades que generen. La irregularitat de la costa catalana permet estudiar els efectes d'assolir molt altes resolucions, d'1x1 km, en un període de tempesta.

Amb la col·laboració del *Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS), en aquest estudi s'ha començat realitzant un anidament utilitzant el model meteorològic WRF-ARW, conjuntament a un anàlisi de sensibilitat d'aquest enfront la parametrització de la turbulència (considerant la formulació de *Yonsei University*, YSU, i la formulació de Mellor-Yamada-Janjic, MYJ) i les dades globals que forcen el model meteorològic (FNL, GFS, ERA-Interim i EFIX). Les variables considerades en aquest bloc del treball són la velocitat i direcció mitjanes del vent a 10 m d'altura.

Amb aquestes dades i la col·laboració del *Laboratorio de Ingeniería Marítima* (LIM) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), s'ha realitzat un anidament i un anàlisi de sensibilitat del model de generació i propagació de l'onatge SWAN enfront a combinacions de diferents resolucions dels dominis i *inputs* del model. Les variables considerades en el bloc d'onatge són l'altura d'ona significant, el període de pic i la direcció mitjana de l'onatge.

D'aquests resultats es conclou que assolir molt altes resolucions (tant camps de vent com dels dominis del model d'onatge) no genera tants beneficis com en anteriors anidaments (de resolucions de fins a 3x3 km), a excepció de les direccions. També s'ha observat que el millor camp de vents no té perquè generar el millor camp d'onatge.

Resumen

Los fenómenos meteorológicos extremos, como las tormentas, generan afectaciones socioeconómicas importantes en las zonas costeras, ya que en ellas se desarrollan diversas actividades de ocio y de gran impacto económico.

No obstante, las resoluciones de los productos generados por los modelos globales (del orden de 50x50 km) son demasiado bajas para su uso en zonas costeras, debido a la gran variabilidad orográfica de estas, provocando predicciones sesgadas o imprecisas de los modelos de oleaje o de los modelos oceánicos. Para poder adaptarse a esta complejidad es necesario anidarse en los modelos globales para aumentar la resolución de los dominios y de los datos que generan. La irregularidad de la costa catalana permite estudiar los efectos de llegar hasta muy altas resoluciones, de 1x1 km, en un periodo de tormenta.

Con la colaboración del *Barcelona Supercomputing Center* – Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS), en este estudio realizando un anidamiento del modelo meteorológico WRF-ARW, junto un análisis de sensibilidad de este enfrente la parametrización de la turbulencia (considerando la formulación de *Yonsei University*, YSU, y la formulación de Mellor-Yamada-Janjic, MYJ) y de los datos globales que fuerzan el modelo meteorológico (FNL, GFS, ERA-Interim y EFIX). Las variables consideradas en este bloque son la velocidad y dirección medias del viento a 10 m de altura.

Con estos datos y con la colaboración del Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC), se ha realizado un anidamiento y un análisis de sensibilidad del modelo de generación y propagación del oleaje SWAN enfrente a combinaciones de diferentes resoluciones de los dominios y *inputs* del modelo. Las variables consideradas en este bloque son la altura significativa, el período de pico y la dirección media del oleaje.

De estos resultados se concluye que alcanzar muy altas resoluciones (tanto de los campos de viento como de los campos de oleaje) no genera tantos beneficios como en anteriores anidamientos (de resoluciones del orden de 3x3 km), a excepción de las direcciones. También se ha observado que el mejor campo de vientos no tiene porqué generar el mejor campo de oleaje.

Abstract

Extreme meteorological phenomena (p.e. storms) generate additional socioeconomic effects in coastal areas, where are developed many leisure activities or activities with huge economic impacts.

However, the resolutions (around 50x50 km) of the products generated by global models are too small for using them in coastal areas, due to their orographic variability, driving into biased or inaccurate predictions of wave models or oceanic models. Then, there is a need to nest into this global models to increase the resolution of the domains and the data they produce to adapt better this complexity of the coastal areas. The irregularity of the catalan coast permits to study the effects of reaching very high resolutions, of 1x1 km, during a storm period.

In collaboration with the Barcelona Supercomputing Center – *Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS), the present work proceed to do a nesting using the meteorological model WRF-ARW, together with a sensibility analysis of it in front the parametrization of turbulence (considering the formulation of Yonsei University, YSU, and the formulation of Mellor-Yamada-Janjic, MYJ) and the data from global models (FNL, GFS, ERA-Interim and EFIX) which feed the meteorological model. The variables considered in this block are the mean wind speed and the mean direction of the wind, both at 10 m high.

Using these results and in collaboration with the *Laboratorio de Ingeniería Marítima* (LIM) of the *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC), it has been done a nesting and a sensibility analysis of the wave generation and propagation model SWAN in front combinations of different resolutions of the domains and the inputs of the model. The variables considered in this block are the significant wave height, the peak period and the mean wave direction.

From those results it is possible to conclude that reaching very high resolutions (either of the wind fields or the wave fields) does not generate as much benefits as in previous nestings (of resolutions of 3x3 km), except in the case of wind and wave directions. Additionally, it has also been observed that the best wind field doesn't have to generate the best wave field.

Índex

1. Introducció.....	- 1 -
2. Estat de l'Art	- 3 -
2.1. Àrea d'estudi.....	- 3 -
2.2. Estudis previs.....	- 5 -
3. Objectius	- 14 -
4. Materials i mètodes	- 16 -
4.1. Metodologia	- 16 -
4.2. Dades: origen, format i qualitat.....	- 17 -
4.2.1. Arxius dels models meteorològics globals	- 18 -
4.2.2. Batímetria	- 19 -
4.2.3. Mesures en boies/estacions	- 20 -
4.2.3.1. Pont del Petrolí	- 22 -
4.2.3.2. Boies Xarxa REDEXT	- 23 -
4.2.3.3. Boies Xarxa REDCOS	- 24 -
4.2.3.4. Estació de l'Aeroport de Barcelona (tipus ASOS)	- 26 -
4.2.3.5. Estacions del SMC	- 27 -
4.2.3.6. Dades de la AEMET	- 29 -
4.3. Període d'estudi	- 30 -
4.4. Model meteorològic: sistema WRF-ARW	- 33 -
4.4.1. Introducció	- 33 -
4.4.2. Estructura del model.....	- 33 -
4.4.3. Equacions de govern i parametrització de la PBL	- 35 -
4.4.3.1. Equacions d'Euler	- 36 -
4.4.3.2. Parametrització de la PBL	- 37 -
4.4.4. Discretització	- 38 -

4.4.4.1.	Discretització horitzontal	- 38 -
4.4.4.2.	Coordenada vertical i variables	- 39 -
4.4.4.3.	Discretització temporal	- 39 -
4.4.5.	Configuració del model WRF	- 40 -
4.5.	Model de generació i propagació d'onatge: model SWAN ..	- 43 -
4.5.1.	Introducció	- 43 -
4.5.2.	Estructura del model	- 43 -
4.5.3.	Equacions de govern	- 44 -
4.5.4.	Discretització	- 47 -
4.5.4.1.	Discretització espacial	- 47 -
4.5.4.2.	Discretització espectral	- 48 -
4.5.4.3.	Mètode del <i>Sweep</i>	- 48 -
4.5.5.	Configuració del model SWAN	- 49 -
4.6.	Eines de validació	- 50 -
4.6.1.	Pbias	- 51 -
4.6.2.	Diagrama de Taylor	- 51 -
4.7.	Entorns de treball	- 53 -
4.7.1.	Supercomputador <i>MareNostrum</i> III	- 54 -
4.7.2.	Sistema Titani	- 55 -
5.	Resultats	- 57 -
5.1.	Resultats del model meteorològic	- 57 -
5.1.1.	Pont del Petroli	- 58 -
5.1.2.	Boia de Tarragona (REDEXT)	- 62 -
5.1.3.	Configuració òptima del model meteorològic	- 66 -
5.1.4.	Anidament de la configuració òptima	- 67 -
5.2.	Resultats del model d'onatge	- 74 -

5.2.1. Pont del Petroli	- 75 -
5.2.1.1. Altura d'ona significant.....	- 75 -
5.2.1.2. Període pic.....	- 78 -
5.2.2. Boia de Tarragona (REDEXT)	- 81 -
5.2.2.1. Altura d'ona significant.....	- 81 -
5.2.2.2. Període de Pic	- 84 -
5.2.2.3. Direcció mitjana l'onatge.....	- 87 -
5.2.3. Configuració òptima del model SWAN.....	- 89 -
6. Discussió	- 91 -
7. Conclusions i treballs futurs	- 94 -
8. Bibliografia.....	- 96 -

Annex 1. Resultats del model meteorològic

Annex 2. Resultats del model d'onatge

Índex de figures

Figura 1: (esquerra) Pesquer en el pg. marítim de Blanes (Girona) degut a un temporal al desembre de 2008. [Font: Townsend, R.]. (dreta) Platja de S'Abanell (Blanes, Girona), amb el pg. marítim destrossat després d'un temporal.. [Font: Jiménez, J.A.].	- 1 -
Figura 2: Fase positiva (esquerra) i negativa (dreta) de la NAO.....	- 3 -
Figura 3: Imatge de la Península Ibèrica, amb els accidents geogràfics més rellevants, en particular a Catalunya (requadre vermell).....	- 4 -
Figura 4: Representació d'un anidament partint d'un domini que abasta tota Europa fins a un domini que representa la costa catalana, passant per un domini del Mediterrani Occidental. Els números indiquen el domini corresponent. [Font pròpia].	- 7 -
Figura 5: Representació de l'espectre de l'energia de l'ona en (a) 2D i (b) 1D, diferenciant entre mar de fons (swell) i mar de vent (wind). [Font: Reproducció segons Holthuijsen, 2007, amb el permís de la Cambridge University Press].....	- 9 -
Figura 6: Definició de l'Alçada d'ona i el Període en un sèrie temporal de l'elevació de la superfície del mar (l'ona és definida a partir del creuament pel zero). [Font: Holthuijsen, 2007].	- 11 -
Figura 7: Esquemes de càlculs en paral·lel: (a) i (b) són MPI, (c) és OpenMP. [Font: Miym 2009].	- 12 -
Figura 8: Esquema del procés de simulació de l'onatge utilitzant un model meteorològic i un model de generació i propagació de l'onatge.	- 16 -
Figura 9: Mapa de la màscara de costa utilitzada en la variable SST dels arxius ERA-Interim (superior) i EFIX (inferior). [Font: pròpia].	- 19 -
Figura 10: Mapa de la localització de les diferents estacions marítimes, boies i el Pont del Petroli, (vermell) i estacions meteorològiques (blau) de les que es disposen dades. [Font: pròpia].	- 20 -
Figura 11: Imatge del Pont del Petroli i de l'estació de mesura (únicament es veu la part meteorològica, la oceanogràfica està submergida). [Font: Garcia, A.].....	- 22 -
Figura 12: Línia de fondeig d'una boia Seawatch. [Font: Puertos del Estado].....	- 24 -
Figura 13: Esquema de fondeig d'una boia Triaxys. [Font: Puertos del Estado].....	- 25 -
Figura 14: Rosa dels vents a la plataforma petrolífera de Casablanca entre els anys 1996 i 2003. L'escala de grisos representa la velocitat del vent (m/s). [Font: Bolaños et al., 2009].....	- 30 -
Figura 15: Distribució de l'altura d'ona significativa (H_s) i període mitjà per a la boia XIOM de Llobregat. L'escala de grisos representa el nombre de casos. Informació agrupada en elements de 0.2s i 20 cm.. [Font: Bolaños et al., 2009]	- 31 -

Figura 16: Rosa dels vents a la Boia exterior de Tarragona (REDEXT) entre el 25 de febrer del 2013 i el 6 de març del mateix any. [Font: pròpia, a partir de les dades de Puertos del Estado].	- 31 -
Figura 17: Distribució de l'altura d'ona significant (H_s) i el període mig espectral (T_{m02}) a la Boia de Barcelona II (REDCOS). [Font: pròpia, a partir de les dades de Puertos del Estado].	- 32 -
Figura 18: Esquema del flux de càlcul de les components del mòdul WPS i com aquest alimenta, com a dades inicials, al sistema ARW. El text en les caixes rectangulars indica el nom del programa que s'utilitza en cada moment. [Font: Skamarock et al., 2008].	- 34 -
Figura 19: Esquema dels fluxos d'informació entre dominis segons el '1-way' (I) i el '2-way' (II). [Font: Soret et al., 2011].	- 35 -
Figura 20: Discretització del domini segons una malla Arakawa C. Apareixen les components horitzontals de la velocitat ("U" i "V") i les variables termodinàmiques (" θ "). [Font: Skamarock, 2008].	- 38 -
Figura 21: Representació de la variable η del ARW. [Font: Skamarock et al., 2008].	- 39 -
Figura 22: Representació dels dominis utilitzats en el model meteorològic WRF: (1) Mar Mediterrani, 27x27 km de resolució; (2) Mar Mediterrani Occidental, 9x9 km de resolució; (3) Mar Balear i Costa Catalana, 3x3 km de resolució; (4) Costa Catalana, 1x1 km de resolució. [Font: pròpia].	- 41 -
Figura 23: Esquema del procés de simulació, dia a dia amb escalfament de 12h (tram taronja) i obtenció de resultats les 24h del dia (tram blau). [Font: pròpia].	- 42 -
Figura 24: Variació de la pressió del vent actuant sobre una onada. [Font: Holthuijsen, 2007].	- 46 -
Figura 25: Procediment per resoldre la propagació de l'onatge en l'espai considerant el quadrant de la direcció (àrea ombrejada) apropiat a cada un dels sweeps. [Font: SWAN Scientific and Technical Documentation].	- 48 -
Figura 26: Relació Geomètrica entre el coeficient de correlació (R), l'error quadràtic mig centrat (E') i les desviacions estàndards σ_f i σ_r de les simulacions i les mesures, respectivament. [Font: Taylor, 2001].	- 52 -
Figura 27: Diagrama per a representar patrons estadístics. La distància radial des de l'origen és proporcional a σ . El RMS centrat entre simulacions i mesures és proporcional a la distància entre els corresponents punts en el Diagrama. R es representa en la direcció angular. [Font: Taylor, 2001].	- 53 -
Figura 28: Imatge del sistema MareNostrum III l'any 2012. [Font: BSC-CNS].	- 54 -
Figura 29: Sèries Temporals de la velocitat mitjana del vent a 10m d'altura al Pont del Petroli segons mesures locals, model AMET (5x5 km de resolució) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).	- 59 -

Figura 30: Diagrames de Taylor de la velocitat (a) i direcció (b) mitjanes del vent a 10m al Pont del Petroli segons mesures, dades d'AEMET (5 km de resolució) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3 km de resolució).	59 -
Figura 31: Roses dels vents de les mesures (Pont del Petroli), dades d'AEMET (5x5 km de resolució), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació YSU de la PBL.	60 -
Figura 32: Roses dels vents de les mesures (Pont del Petroli), dades d'AEMET (5x5 km de resolució), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació MYJ de la PBL.	61 -
Figura 33: Sèries Temporals de la velocitat mitjana del vent a 10m d'altura la boia exterior de Tarragona segons mesures locals, dades d'AMET (resolució de 5x5 km) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).	63 -
Figura 34: Diagrames de Taylor de la velocitat (a) i direcció (b) mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona segons mesures, dades d'AEMET (resolució de 5x5 km) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).- 63 -	-
Figura 35: Roses dels vents de les mesures (boia exterior de Tarragona), de dades d'AEMET (resolució de 5x5 km), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació YSU de la PBL.....	64 -
Figura 36: Roses dels vents de les mesures (boia exterior de Tarragona), dades d'AEMET (resolució de 5x5 km), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació MYJ de la PBL.....	65 -
Figura 37: Sèries temporal de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura al Pont del Petroli de les mesures, dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i dels resultats del model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".	67 -
Figura 38: Roses dels vents de les mesures del Pont del Petroli, de dades d'AEMET (5x5 km de resolució) i dels resultats del model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".	68 -
Figura 39: Roses dels vents de les mesures de la Boia de Tarragona (REDEXT), el model AEMET (resolució de 5x5 km) i els dominis utilitzats en el model WRF per al camp de vents "ERA & YSU".	69 -
Figura 40: Sèries temporals de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura a la boia exterior de Tarragona de les mesures, de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i el model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".	70 -
Figura 41 Diagrames de Taylor de la velocitat i direcció mitjanes del vent a 10 m d'altura al Pont del Petroli (a) i a la Boia Exterior de Tarragona (b) de les mesures, el model AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i el model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 33 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".	70 -

Figura 42: Mapa de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura (barra de colors) cada 12h entre el 28 de febrer a les 00:00 i el 3 de març a les 00:00, per al domini de 3x3 km i la parametrització de la PBL segons "YSU" del model WRF forçat amb vents "ERA".....	- 73 -
Figura 43: Evolució del Pbias l'altura d'ona significant al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 76 -
Figura 44: Sèries temporals de l'altura d'ona significant, en les diferents configuracions del model SWAN, al Pont del Petroli per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.	- 76 -
Figura 45: Diagrames de Taylor de l'altura d'ona significant al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.....	- 77 -
Figura 46: Sèries temporals del període de pic, en les diferents configuracions del model SWAN, al Pont del Petroli per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.	- 78 -
Figura 47: Evolució del Pbias del període de pic al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 79 -
Figura 48: Diagrames de Taylor del període de pic al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 80 -
Figura 49: Evolució del Pbias de l'altura d'ona significant a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 81 -
Figura 50: Sèries temporals de l'altura d'ona significant, en les diferents configuracions del model SWAN, a la boia exterior de Tarragona, per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.....	- 82 -
Figura 51: Diagrames de Taylor de l'altura d'ona significant a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 83 -
Figura 52: Evolució del Pbias del període de pic a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 84 -
Figura 53: Sèries temporals del període de pic, en les diferents configuracions del model SWAN, a la boia exterior de Tarragona, per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.	- 85 -
Figura 54: Diagrames de Taylor del període de pic a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.	- 86 -

- Figura 55: Evolució del Pbias de la direcció mitjana de l'onatge a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF. - 87 -
- Figura 56: Diagrames de Taylor de la direcció mitjana de l'onatge a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF. - 88 -
- Figura 57: Mapa de l'altura d'ona significant (barra de colors) cada 12h entre el 28 de febrer a les 00:00 i el 3 de març a les 00:00, per a la configuració 3 del model SWAN per a camps de vent EFIX & MYJ del WRF (configuració òptima). - 90 -

Índex de taules

Taula 1: Tipus d'arxius utilitzats per forçar el model meteorològic, segons el model d'on resulten i el centre al qual pertanyen.....	18 -
Taula 2: Característiques de les localitzacions d'on es disposen mesures. ASM fa referència a Altura Sobre el Nivell del Mar. Entre parèntesis les variables considerades en el present estudi: v_m és la velocitat mitjana del vent; dir és la direcció mitjana de procedència del vent; H_s és l'altura d'ona significant espectral; T_p és el període de pic i D_{md} és la direcció mitjana de procedència de l'onatge. [Font: pròpia].....	21 -
Taula 3: Opcions de la Planetary Boundary Layer. [Font: Skamarock, 2008].....	37 -
Taula 4: Nomenclatura de cada una de les configuracions del model meteorològic utilitzades en el present estudi. [Font: pròpia].	40 -
Taula 5: Configuració dels dominis del model WRF. [Font: pròpia].	41 -
Taula 6: Configuració del model SWAN per a un camp de vents determinat en funció de la resolució del seu domini, els camp de vents i les dades del contorn.	50 -
Taula 7: Coordenades dels diferents dominis considerats en el model SWAN.	50 -
Taula 8: Recursos de temps i memòria consumits per node en les simulacions de l'onatge (simulant tota la tempesta), per a 10 nodes de càlcul.	56 -
Taula 9: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) i de dades d'AEMET (resolució 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m en el Pont del Petroli.-	62 -
Taula 10: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) i de les dades d'AEMET (resolució de 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona.	66 -
Taula 11: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents dominis del model WRF (resolucions 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) i de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m al Pont del Petroli per al camp de vents "ERA & YSU".....	71 -
Taula 12: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents dominis del model WRF (resolucions 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) i de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona per al camp de vents "ERA & YSU".....	71 -

Llista d'acrònims

ACRÒNIM	DESCRIPCIÓ
SWAN	Simulating Waves Nearshore
WRF	Weather Research & Forecasting
NAO	North Atlantic Oscillation
ARW	Advanced Research WRF
DIA	Discrete Interaction Approximation
WAM	Wave Modellig Group
MPI	Distributed Memory Parallel
OpenMP	Shared Memory Parallel
BSC	Barcelona Supercomputing Center
CNS	Centro Nacional de Supercomputación
LIM	Laboratorio de Ingeniería Marítima
NCEP	National Center of Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NWS	National Weather Service
ECMWF	European Center for Mediu-Range Weather Forecasts
AEMET	Agència Estatal de Meteorología
GFS	Global Forecasting System
FNL	(Final) Operational Glonal Analysis
ERA-Interim	ECMWF Re-Analysis
EFIX	ECMWF Re-Analysis (Fixed)
SST	Sea Surface Temperature
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Ocean
ASOS	Automated Surface Observing System
SMC	Servei Meteorològic de Catalunya
REDEXT	Red Exterior
REDCOS	Red Costera
XIOM	Xarxa de Instrumentació Oceanogràfica i Meteorològica
WPS	WRF Pre-processing System
PBL	Planetary Boundary Layer
Corine	Coordination of Information on the Environment
BSBT	Backward Space, Backward Time
HIRLAM	High Resolution Limited Area Model
HRM (DWD)	High Resolution Model (Deutscher Wetterdienst)
COSMO	Consortium for Small-scale Modeling
MM5 (PSU/NCAR)	Mesoscale Model (Pennsylvania State University/ National Center for Atmospheric Research)
UM (UK)	Unified Model
GEM (CMC)	Globl Environmental Multiscale Model (Canadian Meteorological Center)
IFS (ECMWF)	Integrated Forecasting System
GSM (JMA)	Global Spectral Model (Japan Meteorological Agency)

1. Introducció

Avui en dia, es necessiten previsions meteorològiques i de l'estat del mar per informar a la població, als responsables de la protecció civil i a les autoritats portuàries, entre d'altres, per a poder gestionar els recursos enfront fenòmens extrems. Per a obtenir aquestes previsions s'utilitzen, principalment, models meteorològics. La validesa d'aquesta informació depèn de la qualitat de les dades necessàries per a calibrar els models, l'habilitat dels tècnics a l'hora d'utilitzar aquests models i del grau d'error acceptable de l'usuari.

Per a aplicacions en l'enginyeria és vital tenir bones dades i prediccions, sobretot, de les tempestes, que són les que poden generar danys a curt i mitjà termini. Els fenòmens a llarg termini (com per exemple la creixença continuada del nivell del mar) passen a un segon pla, ja que són sempre més difícil d'estudiar i predir perquè es generen per la superposició de diversos fenòmens (per exemple el canvi climàtic), i no sempre coneguts.

Els principals factors d'una tempesta que poden provocar danys són la precipitació i el vent. Si aquesta es produeix en zones costaneres l'onatge generat per aquests vents generarà danys addicionals a la costa.

La costa catalana és una zona que pateix tempestes molt intenses, les quals generen problemes i danys, tant socials com econòmics, a les poblacions costaneres (Figura 1).

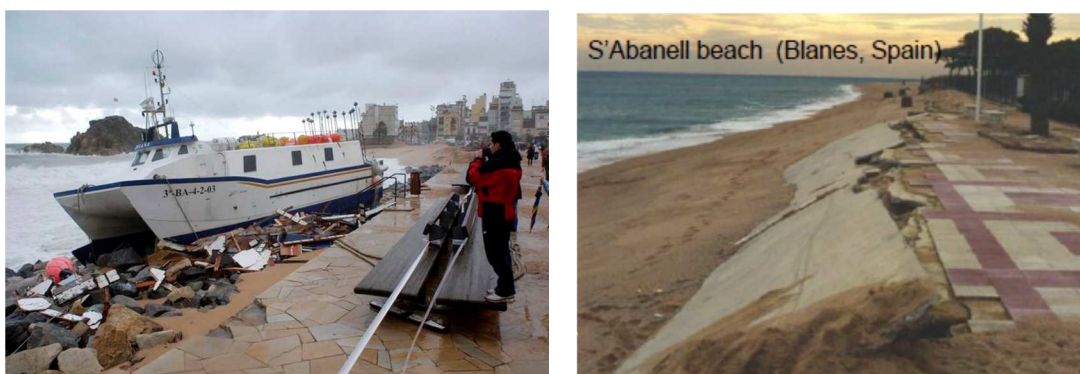


Figura 1: (esquerra) Pesquer en el pg. marítim de Blanes (Girona) degut a un temporal al desembre de 2008. [Font: Townsend, R.]. (dreta) Platja de S'Abanell (Blanes, Girona), amb el pg. marítim destrossat després d'un temporal.. [Font: Jiménez, J.A.].

És per això que les administracions sempre s'han preocupat de tenir un bon coneixement de l'estat del mar, ja sigui del patró de comportament al llarg de l'any (que pugui generar acumulació de danys), o bé de les condicions marítimes quan una tempesta arriba a la costa. Els motius d'aquest interès es poden agrupar, principalment, en tres grups:

- Poder realitzar millors dissenys (millor adaptats) d'infraestructures (incloent la pròpia platja) i edificis a la zona costanera.
- Protecció Civil amb *Sistemas de Alerta Temprana* (SAT).
- Càlcul de danys i zones de risc ocasionats per la tempesta
- Accions de recuperació.

En el primer cas, es poden generar costos addicionals, tant de manteniment com de millora, si no s'han considerat correctament les condicions meteorològiques i de l'estat del mar a l'hora de realitzar el disseny de la infraestructura.

En el segon cas, un bon coneixement dels temporals, enllaçat a un SAT, permetria advertir i informar a la població, des de les autoritats competents, de les activitats que es podrien dur a terme a les zones costaneres i les que no.

I per últim, la possibilitat de conèixer els zones de risc permetria un millor ús dels recursos, destinant-los a aquelles àrees més vulnerables a les accions dels temporals marítimes, així com les accions de recuperació corresponents als danys ocasionats durant les tempestes.

En aquest estudi es pretén estudiar si la millora dels camps de vent (fins assolir altes resolucions, de 1x1 km) durant una tempesta, també generen millores en la predicció dels camps d'onatge. Per a això, s'anidarà el model meteorològic WRF (*Weather Research & Forecasting*) per assolir la resolució desitjada, partint de dades de diferents models globals i utilitzant diferents parametritzacions de la turbulència vertical. Amb aquestes dades, es forçarà el model de generació i propagació d'onatge SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). En ambdós casos, el domini final estarà localitzat a la costa catalana, on es disposa de mesures en diferents localitzacions de la mateixa, per a poder contrastar els resultats. Addicionalment es pretén veure si el camp de vents resultant de la configuració òptima del model WRF és el que generarà el millor camp d'onatge i quant recomanable (o no) és assolir la màxima resolució.

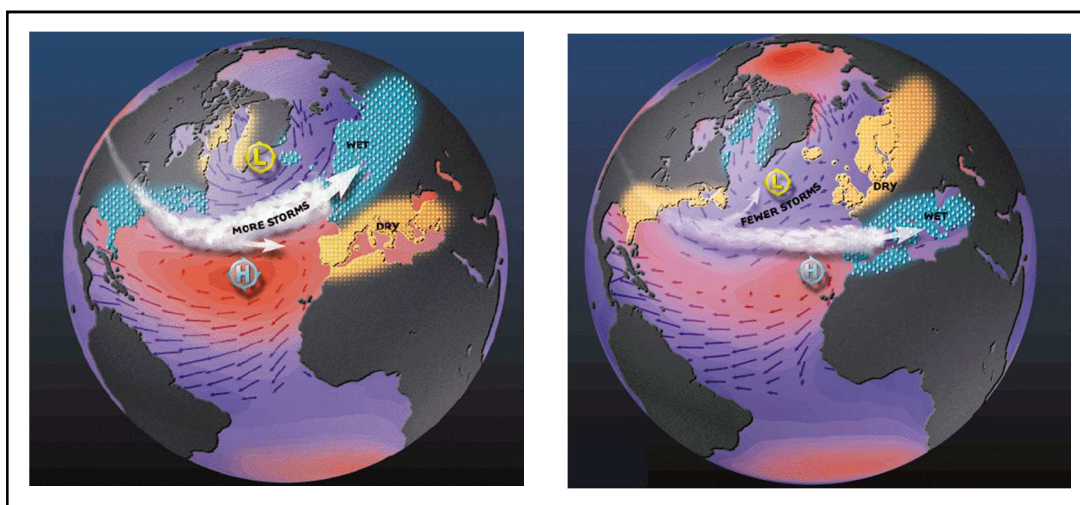
2. Estat de l'Art

En aquest apartat s'introduiran conceptes previs, com són l'àrea d'estudi i els estudis previs dels quals es parteix, per tal d'entendre el desenvolupament i els objectius d'aquesta tesina.

2.1. Àrea d'estudi

L'àrea escollida és la costa catalana, la qual està situada a l'extrem nord-oest del Mar Mediterrani. Aquesta costa, d'aproximadament uns 700 km de longitud, forma part de les costes espanyoles i abasta des de la longitud 0° 45' E fins 3° 15' E i des de la latitud 40° 45' N fins 42° 25' N (Bolaños et al., 2009).

Globalment, el mecanisme que més influencia les condicions meteorològiques (en particular, la intensitat i direcció dels vents) a l'oest d'Europa és l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord, NAO en les seves sigles en anglès, (Figura 2). La NAO és un canvi de pressió atmosfèrica, produït sobre l'oceà atlàntic, en sentit nord-sud (o vice-versa) entre el sistema de baixes pressions d'Islàndia i el sistema d'altres pressions de les Azores. Durant l'estiu (fase positiva de la NAO) les majors pressions del sistema de las Azores fa que el clima al nord d'Europa es torni humit mentre que al Mediterrani es manté sec. A l'hivern (fase negativa de la NAO) pressions inferiors del sistema de les Azores provoca la situació inversa.



*Figura 2: Fase positiva (esquerra) i negativa (dreta) de la NAO.
[Font: <http://www.ldeo.columbia.edu/NAO>].*

A la Península Ibèrica, els patrons de vents a l'estiu i a l'hivern són semblants, però a l'estiu les velocitats del vent són inferiors (Baldasano et al., 1994; Millán et al., 1997; Toll and Baldasano, 2000; Martín-Vide and Olcina, 2001; Soriano et al., 2001; Pérez et al., 2004). En el treball de Jorba et al. (2004), on s'estudia climatològicament la dinàmica de les masses d'aire, es conclou que al nord-est de la Península Ibèrica (on està situada la costa catalana) es produeixen forçaments sinòptics dèbils. Per tant, els fenòmens de mesoescala, influenciats per la topografia de cada regió, són els que dominen els patrons de circulació. La topografia més rellevant de Catalunya (requadre vermell de la Figura 3) són la serralada dels Pirineus al nord de l'àrea d'estudi, actuant com a barrera i modificant els camps de vent cap a direccions nord i nord-est (Bolaños et al., 2009) i les valls dels rius, principalment el riu Ebre, que canalitzen aquests vents. Els vents més intensos es produeixen als mesos de febrer, març, abril i novembre, provinents del sud i de l'est (Arnau, 2000), coincidint amb les condicions de tempesta més intenses a la costa catalana (Mendoza et al., 2011).



Figura 3: Imatge de la Península Ibèrica, amb els accidents geogràfics més rellevants, en particular a Catalunya (requadre vermell).

Pel que fa a les condicions d'onatge, importants per la gran quantitat d'energia que tenen associades, aquestes pateixen variacions al llarg de la costa degut a una batimetria complexa, amb canons submarins i variabilitat en l'ample de la plataforma continental (Sanchez-Arcilla et al., 2008; Bolaños et al., 2009). Com a exemples d'aquesta variabilitat hi ha onatges provinents del nord-oest i del nord a la costa sud i nord, respectivament, de Catalunya, mentre que a la costa central les condicions més comuns són onatges de l'est i el sud (Sanchez-Arcilla et al., 2008).

Com ja s'ha comentat, els vents més intensos provenen de l'est, els quals, els quals disposen d'un major *fetch* (longitud on el vent té capacitat per generar onatge), provoquen els majors onatges, provinents d'aquesta mateixa direcció. No obstant, a la costa catalana el *fetch* està limitat per les característiques d'aquesta part del Mar Mediterrani, per tant, també ho serà la capacitat per generar onatge. El Mar Mediterrani Occidental es caracteritza per períodes de calma al llarg de la major part de l'any, però a partir de dades de boies de mesura de la zona s'ha pogut determinar tempestes intenses tot i el *fetch* limitat esmentat anteriorment (Bolaños et al., 2009)

2.2. Estudis previs

Per a l'estudi dels impactes que generen certs fenòmens naturals, la millor eina que es té a l'abast són els models numèrics que permetin simular el comportament d'aquests fenòmens, complementats amb observacions de les zones d'interès per així calibrar i validar els models. En el cas d'afectacions a la costa a causa de temporals marítims, la millor solució és utilitzar models acoblats amb una component meteorològica i una altra component oceanogràfica, tal i com es porta treballant des de les tres últimes dècades (Hodur 1977; Seo et al. 2006; Warner et al. 2008, 2010; Bertotti et al. 2011). D'aquesta manera, la bona comprensió i la validació de cada component del model acoblat permetrà limitar de manera important els errors que poden transferir-se de la component meteorològica a la component d'onatge (Bricheno et al. 2013).

La millora, al llarg dels anys, en la resolució espacial i temporal de les dades meteorològiques (dels principals centres meteorològics mundials, amb resolucions al voltant dels 50x50 km), a permès obtenir valors més exactes de les variables oceanogràfiques. No obstant, aquestes millores s'aconsegueixen principalment a mar obert, ja que a l'aproximar-se a la costa (orografia menys uniforme), l'onatge predit és menys precís. Aquesta imprecisió és deguda a canvis en els usos del sòl i en les propietats físiques, que no permeten que el model capti bé els processos físics ni les condicions locals (Bricheno et al. 2013).

Quan l'interès d'un estudi es centra en zones a una escala regional o local (àrees de l'ordre de milers i centenars de km², respectivament) , l'ús de dades a escales

globals o sinòptiques (a nivell continental o mundial) pot no ser encertat. Aquests models globals solen generar dades amb resolucions massa baixes (pocs punts, o nodes de càlcul, amb informació) per captar bé tant el domini físic com els fenòmens físics que es vulguin estudiar en la zona d'interès. Per a aconseguir augmentar la resolució de la informació, actualment es realitzen anidaments respecte els dominis globals.

El mètode dels anidaments es basa en anar delimitant dominis més petits i de major resolució dins d'altres dominis majors (iniciant-se normalment en dominis globals). No obstant, el rati entre la longitud del domini 'pare' i el domini 'fill' (anidat) no pot ser qualsevol, ja que podria ser que un rati excessivament gran (és a dir, que el domini anidat sigui excessivament petit) doni lloc a divergències o interpolacions que no captin bé la realitat. Per a que el mètode sigui més eficient, quants menys dominis s'utilitzin millor (menys càlculs es realitzaran). Els ratis ($1/r$) acceptats pel model WRF són per valors imparells de 'r', en els casos reals (ARW User's Guide, 2016).

A la Figura 4 es pot observar com a cada domini anidat, la definició de la costa és millor, degut a un augment de la resolució del domini espacial (més elements de malla), ja que al domini 1 no es detecta el cap de creus ni el delta de l'Ebre i, a mesura que es mou del domini 2 al 3, la definició d'aquest accidents geogràfics millora. La foscor del domini 3 és indicatiu de la gran quantitat d'elements que defineixen la malla.

És per això, que per a poder aproximar-se als fenòmens de les tempestes en zones concretes de la costa és necessari augmentar la resolució dels dominis de càlcul i dels camps de vents. Aquest augment es fa fins a assolir altes resolucions capaces de treballar amb detalls geogràfics locals, no visibles en els models globals (Bertotti, L. et al. 2014).

Ardhuin et al. (2007) i Bertotti et al. (2011) van torbar diferències notables entre els resultats obtinguts a partir de diferents models meteorològics i d'onatge, per a una tempesta extrema al Mar Mediterrani Occidental, relacionades amb els valors pic de la velocitat del vent i de l'altura d'ona significant, la distribució general dels camps i en la localització del màxim.

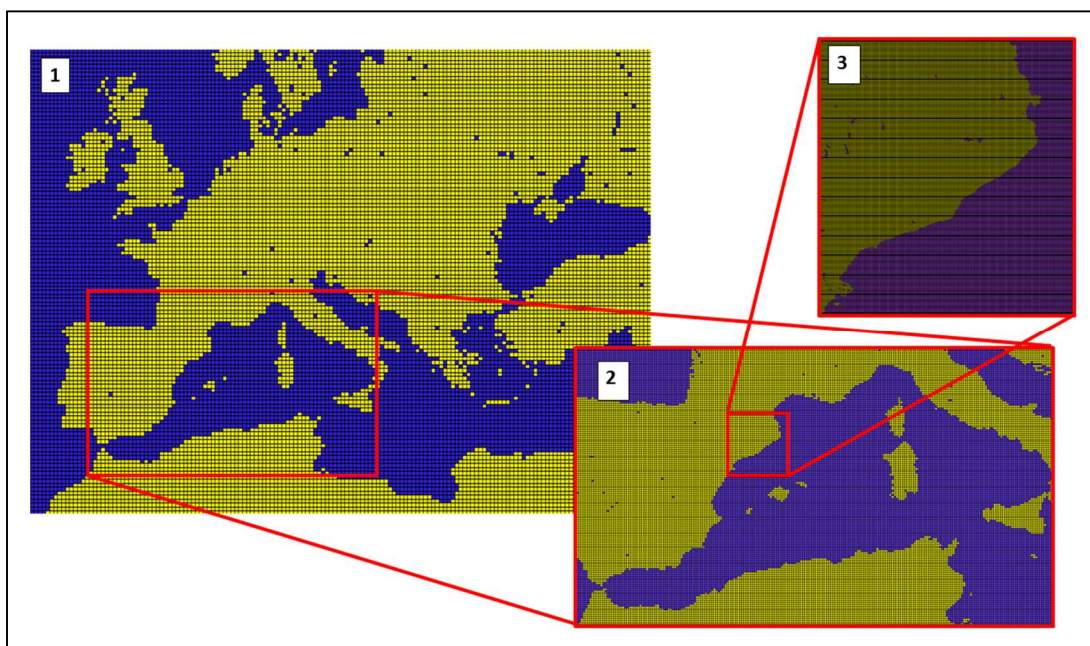


Figura 4: Representació d'una anidament partint d'un domini que abasta tota Europa fins a un domini que representa la costa catalana, passant per un domini del Mediterrani Occidental. Els números indiquen el domini corresponent. [Font pròpia].

Diversos estudis conclouen que hi ha necessitat d'una bona resolució espacial per a caracteritzar correctament els pics de vent de les tempestes (p.ex. Cavaleri 2009), per tal d'aconseguir onatges més precisos. D'altres estudis han confirmat millores en la simulació dels vents i fluxos de calor a la superfície quan s'inclouen dades de satèl·lit, com la temperatura de la superfície del mar, en els models meteorològics (p.e. Seo et al. 2006).

El model WRF (ARW User's Guide, 2016) ha estat utilitzats per a simular les condicions meteorològiques en varies regions costaneres (Caldwell et al. 2009; Jorba et al. 2008; Floors et al. 2011), on el segon remarca l'aparició de problemes en zones amb orografia complexa. El WRF, és un model numèric de mesoescala de pròxima generació que serveix tant per a la predicció operacional com la recerca en meteorologia, aplicant-se a diferents usos i escales espacials.

A causa d'aquesta necessitat d'anidar els dominis per afinar la caracterització del espai i dels fenòmens locals, s'han realitzat diferents estudis que pretenen establir la configuració del WRF més adient en diferents situacions, però malauradament no assolixen escales locals, com pot ser un tram de costa o una badia, (Bukovsky et al. 2000; Caldwell et al. 2009).

No obstant, a major resolució, major és la sensibilitat del model inclús a petits errors del camps provinents dels nius 'pare'. Aquesta sensibilitat depèn molt de les condicions meteorològiques i de la seva incertesa, la qual és actualment contrarestada amb l'ús de prediccions de conjunts pels grans centres operacionals (p.e. Palmer et al, 2009). Addicionalment, s'ha demostrat que l'augment de la resolució dels dominis a través de l'anidament d'aquests no corregeix els errors que puguin tenir els camps globals, o de dominis majors, d'entrada del model (Bertotti, L. et al. 2014).

Un altre dels problemes de modelitzar les tempestes és la interpolació dels camps de vents, la qual sol generar valors suavitzats, limitant la capacitat del model per a captar depressions secundàries, fronts i el fenomen del *sting jet* (Browning 2004). S'ha descobert que millorar la resolució dels models atmosfèrics millora la representació de les tempestes, produint característiques de mesoescala més nítides, així com millores en la representació de fenòmens convectius (Mass et al. 2002).

El principal generador d'onatge és el vent, el qual produeix el que s'anomena mar de vent (wind sea), a la zona de generació (*fetch*). Aquest mar de vent, es pot arribar a propagar cap a zones costaneres produint el que s'anomena mar de fons (*swell*), més regular que l'anterior i marcant una direcció dominant. Aquest vent, que és irregular, els quals generen altures d'ona i períodes irregulars, per tant, fa difícil l'aproximació determinista al problema.

En quant als models d'onatge, actualment existeixen dos tipus de models per a reproduir la propagació i la dissipació de l'onatge generat pel vent:

- *Phase-resolving Models*: descriuen la forma de la superfície del mar. Aquests models permeten incloure els fenòmens de difracció, reflexió i les interaccions no lineals en aigües poc profundes. No obstant, no descriuen la transferència de moment entre l'atmosfera i el mar, és a dir, no permeten generar onatge. Aquest tipus de models són vàlids en dominis molt petits propers a la costa, com és el cas dels ports.
- *Phase-averaged Models*: també anomenats models espectrals, descriuen l'evolució de l'energia de l'onatge, no pas la de la superfície del mar. Els paràmetres que utilitza són estadístics representatius de la superfície del

mar en el temps i l'espai. Aquests models inclouen els principals factors que generen onatge generat pel vent i es poden utilitzar en àmplies àrees.

El nivell del mar en un punt concret en un determinat instant de temps es pot veure com la suma de diferents ones harmòniques, les quals han estat generades per vents turbulents en diferents llocs en diferents instants de temps. Per tant, es poden considerar estadísticament independents i, aplicant la teoria d'ona lineal, segueixen sent independents al llarg del seu recorregut a través de l'oceà.

Donat que les onades són caòtiques i la seva descripció temporal és limitada, es pot utilitzar l'espectre de la densitat de la varianza $E(f)$. Es pot demostrar que la varianza de l'elevació de la superfície del mar és:

$$\langle \eta^2 \rangle = \int_0^{+\infty} E(\omega) d\omega \quad (1)$$

indicant que l'espectre distribueix la varianza al llarg de les freqüències. On ω és la freqüència absoluta. Per tant, $E(\omega)$ s'hauria d'interpretar com una densitat de la varianza. Les dimensions de $E(\omega)$ són m^2/Hz si l'elevació de la superfície del mar està en m i la freqüència en Hz . La varianza de $\langle \eta^2 \rangle$ és igual a l'energia total E_{tot} de l'onada per unitat d'àrea (si es multiplica per un coeficient adient, $\frac{1}{2}\rho_w g$). Per tant, es pot parlar tant de espectre de densitat de la varianza com de espectre de densitat de l'energia (Figura 5).

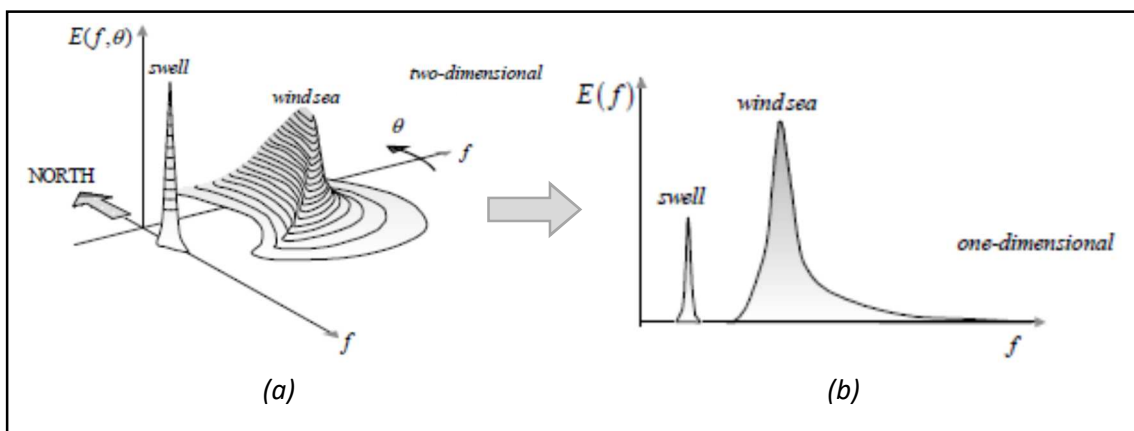


Figura 5: Representació de l'espectre de l'energia de l'ona en (a) 2D i (b) 1D, diferenciant entre mar de fons (swell) i mar de vent (wind). [Font: Reproducció segons Holthuijsen, 2007, amb el permís de la Cambridge University Press].

En alguns problemes és més útil definir la densitat de l'energia en funció de la freqüència distribuïda al llarg d'una direcció (1D), denominant-se llavors com $E(\omega, \theta)$. Aleshores, l'espectre de la densitat de l'energia $E(\omega)$ quedaria com a:

$$E(\omega) = \int_0^{2\pi} E(\omega, \theta) d\theta \quad (2)$$

Es pot obtenir els paràmetres d'integració a partir de la l'espectre de la densitat d'energia en base als seus n moments (equació 3).

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n E(\omega) d\omega \quad (3)$$

La variança de l'elevació de la superfície del mar és el moment 0, m_0 i d'altres paràmetres importants serien:

- L'altura d'ona significant (equació 4): correspon a l'altura mitjana del terç de valors d'altura més alts (Figura 6). Aquesta altura es correlaciona bé amb les mesures visuals de l'onatge.

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = 4 \sqrt{\int_0^{\infty} E(\omega) d\omega} \quad (4)$$

- Període mitjà (equació 5): és el valor mitjà dels períodes de totes les ones amb les que està format l'onatge (Figura 6).

$$T_m = T_{m02} = 2\pi \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{\int_0^{\infty} E(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} \omega^2 E(\omega) d\omega}} \quad (5)$$

- Període pic: és el període associat a la freqüència associada a la major energia (el màxim de l'espectre d'energia).
- Direcció (equació 6):

$$Dir = \arctg \left[\frac{\iint \sin \theta \cdot E(f, \theta) df d\theta}{\iint \cos \theta \cdot E(f, \theta) df d\theta} \right] \quad (6)$$

En la línia d'interès d'aquesta tesina, l'atenció es centra ara en els models de *Phased-averaged*, dels quals existeixen tres generacions diferents.

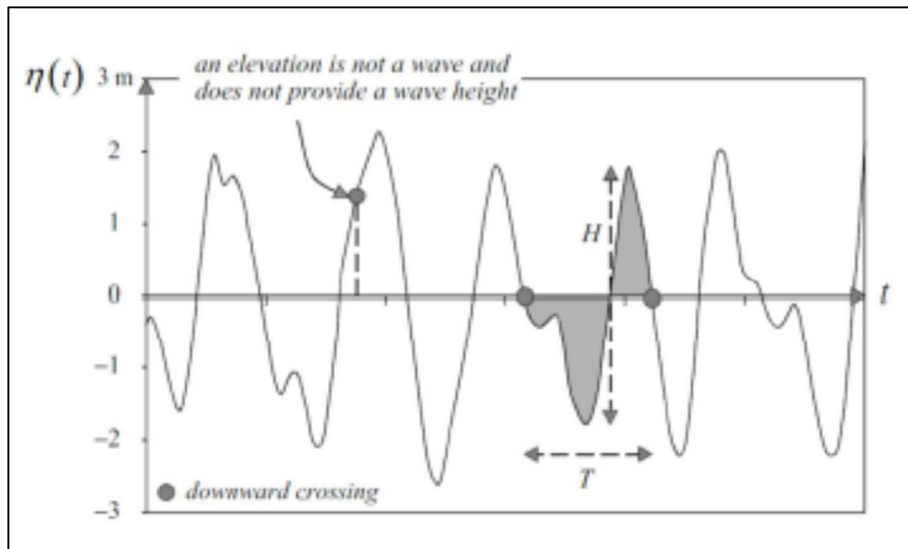


Figura 6: Definició de l'Altura d'ona i el Període en un sèrie temporal de l'elevació de la superfície del mar (l'ona és definida a partir del creuament pel zero). [Font: Holthuijsen, 2007].

En la primera generació, els espectres d'energia es basen en expressions empíriques que donen bons resultats en el creixement de la onada (p.e. Ewing, 1971), però no consideren les interaccions no lineals. En la segona generació, s'introdueixen parametritzacions de les interaccions no lineals (Young, 1988) o es limiten els espectres en funció de les condicions de vent (Holthuijsen i DeBoer, 1988). En totes dues generacions, la forma dels espectres és imposada i parametritzada, obtenint-se resultats diferents quan s'utilitzen diferents models d'aquestes dues generacions quan es forçaven els models amb camps de vent que variaven ràpidament (Jansen et al., 1997).

En canvi, en la tercera generació, basant-se en l'equació del balanç de l'espectre de Hasselmann (Hasselmann, 1960), el terme font es parametritza explícitament i s'integra en el temps, sense assumir cap forma de l'espectre. Aquest fet ha estat gràcies a una parametrització "eficient" (baixos costos computacionals) de les interaccions no lineals coneguda com la DIA, *Discrete Interaction Approximation* (Hasselmann et al., 1985). El model creat es va dir WAM (*Wave Modelling Group*) i, a partir d'ell, es van desenvolupar altres models de tercera generació.

En el model original, els espectres d'energia no s'adaptaven bé a les zones costaneres (absència d'alguns processos costaners i alts costos computacionals per treballar a les escales requerides). El primer model que va tenir en compte

aquests processos i va adaptar l'esquema numèric a les zones costaneres va ser el model SWAN, el qual és un dels models més reconeguts (Booij et al., 1999; Ris et al., 1999).

D'altres millores que s'han produït en els models de tercera generació són: acoblament dels models d'onatge amb models meteorològics i models de corrents (Warner et al., 2010; Bolaños et al., 2011); assimilació de dades de boies i satèl·lits (Abdalla et al., 2006); millores en les parametritzacions físiques (Ardhuin i Roland, 2013) i la millora dels esquemes numèrics per a introduir l'anidament 2-way i malles no estructurades (Zijlema, 2010).

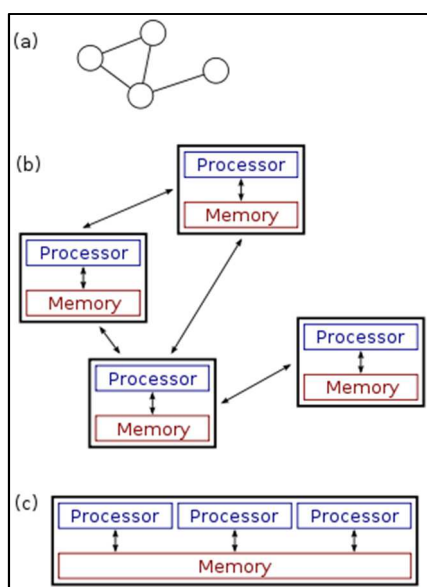


Figura 7: Esquemes de càlculs en paral·lel: (a) i (b) són MPI, (c) és OpenMP. [Font: Miyam 2009].

Les simulacions, tant meteorològiques com oceàniques, requereixen de molts recursos computacionals, sobretot quan es pretén treballar a altes resolucions (s'estableixen molts nodes de càlcul: dominis grans, es simulen varis dies i/o tenen altes resolucions). En el cas dels models meteorològics, a causa del major nombre de factors i termes que intervenen en les equacions, i la major complexitat d'aquestes, aquests costos computacionals esdevenen més acusats.

És per això que actualment es considera l'ús de sistemes de càlcul en paral·lel (Figura 7), com els sistemes *Distributed Memory Parallel* (MPI) o *Shared Memory Parallel* (OpenMP). No hi ha una definició única per a aquests tipus de sistemes (Ghosh 2007), però es solen considerar les següents propietats a l'hora de definir-los:

- Existeixen varies entitats (ordinadors o nodes) de computació autònomes, on cada un d'ells té la seva pròpia memòria local (Andrews 2000; Dolev 2000; Ghosh 2007; Lynch 1996; Peleg 2000).
- Aquestes entitats es comuniquen entre elles a través de missatges.

L'objectiu és solucionar problemes amb grans envergadures computacionals, coordinant l'ús de recursos compartits o facilitar serveis d'informació a l'usuari. A més disposa d'altres propietats com:

- La tolerància d'errors en cada una de les entitats.
- L'estructura del sistema (topologia de la xarxa, nombre d'entitats...) és desconeguda d'entrada. El sistema pot canviar-ho durant la computació.
- Cada entitat té una visió limitada (incompleta) del sistema, coneixent únicament part dels *inputs*.

En els sistemes OpenMP tots els nodes tenen accés a una memòria compartida per transmetre la informació entre ells. En canvi, els sistemes MPI tenen assignada una memòria per a cada node de càlcul

3. Objectius

Com s'ha presentat en l'anterior apartat, tot i que els models globals hagin millorat la seva resolució en els últims anys, segueix sent massa grans per adaptar-se a zones estretes, d'orografia complexa, com ho són les zones costaneres en general i, en particular, la costa catalana. És per això que és necessari dirigir els estudis en les zones costaneres cap dominis de major resolució, capaços d'adaptar-se a aquesta orografia (o batimetria en el mar), forçats amb dades de major resolució, que puguin ajudar a captar els fenòmens més locals que s'hi produeixin.

El present estudi sorgeix de l'interès de dos grups d'investigació diferents: el grup Earth-Science del *Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS), enfocat al sector meteorològic i de contaminació atmosfèrica; i el *Laboratorio de Ingeniería Marítima* (LIM) de la Universitat Politècnica de Catalunya, enfocat cap temes relacionats amb fenòmens marítim i afectacions a la costa. Tots dos grups d'investigació tenen metodologies i interessos diferents i aquesta tesina permet, al primer, ampliar el coneixement de les afectacions que té la meteorologia sobre l'estat del mar i, al segon, conèixer millor l'agent forçador del seu camp de treball.

En el cas dels models d'onatge, el principal forçador és el vent (l'únic considerat en aquest treball). Per tant, el principal objectiu d'aquesta tesina és **obtenir millores en les prediccions dels camps d'onatge a la costa catalana a l'utilitzar camps de vent de molt alta resolució.**

Per a assolir aquest objectiu es realitza un **anàlisi de sensibilitat** dels camps de vent i l'esquema de turbulència utilitzats en el model meteorològic i de la configuració dels dominis del model d'onatge. El procés és el que segueix:

- Utilitzar el model WRF per a obtenir els camps de vent de molt alta resolució (1x1 km) a partir de dades de diferents models meteorològics globals utilitzant el mètode dels anidaments. Es realitzaran diferents simulacions per a incloure els diferents esquemes de turbulència.

- Validar els camps de vent resultants (no només el de molt alta resolució), comparant-los a dades mesurades en diferents localitzacions de la costa catalana.
- Forçar el model SWAN amb els diferents camps de vent resultants del model meteorològic, per a diferents combinacions dels *inputs* i dominis considerats.
- Validar els camps d'onatge resultants, comparant-los amb dades mesurades en diferents punts de la costa catalana.
- Extreure conclusions sobre el comportament dels models enfront els les diferents dades d'entrada considerades en cada cas.

Donat que la millora de les prediccions d'onatge serveix per a tenir millor coneixement dels impactes que els temporals marítims poden generar en les costes i, en última instància, tenir informació a temps real de l'estat del mar per a que els encarregats de prendre decisions actuïn en conseqüència, es vital que els sistema de predicció sigui eficient. És a dir, que els costos computacionals i el temps de càlcul no siguin excessivament elevats, provocant la inviabilitat d'implementar aquests sistemes de predicció a temps real.

Per tant, sorgeixen dos objectius secundaris, però que no són menys importants, que pretenen respondre a les dues següents preguntes:

- Les millores que s'obtinguin (si s'obtenen) amb els camps de vent de molt alta resolució, són prou significatives per a consumir els recursos que requereixen? O, amb vents de menor resolució s'obtenen resultats que, tot i pitjors, són suficientment acurats com per prioritzar els recursos utilitzat?
- De totes les configuracions dels models considerades, el millor camp de vents genera el millor camp d'onatge?

4. Materials i mètodes

En aquest apartat es parlarà sobre de les dades, les eines, el període d'estudi i la metodologia de treball utilitzades en aquest estudi de l'onatge a la costa catalana, per tal d'arribar a assolir els objectius plantejats anteriorment.

4.1. Metodologia

A continuació es presenta el flux de treball que es sol seguir en aquest tipus d'estudi (Figura 8).

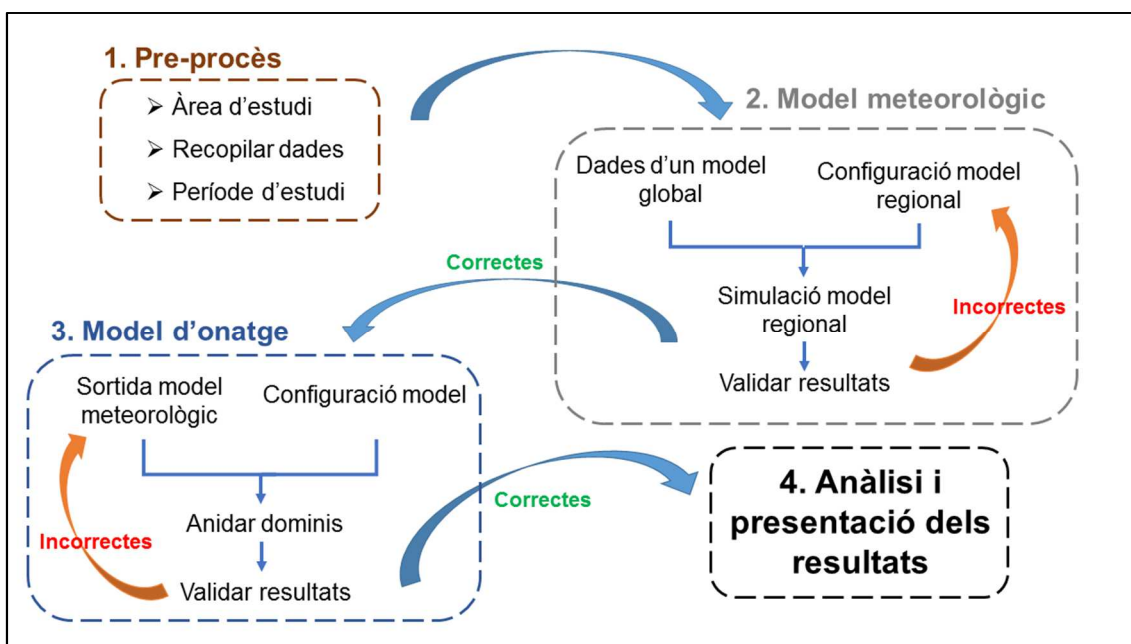


Figura 8: Esquema del procés de simulació de l'onatge utilitzant un model meteorològic i un model de generació i propagació de l'onatge.

Primer de tots es necessita conèixer quines dades de la nostra zona d'estudi hi ha disponibles, tant en temps com en espai. Aquestes, condicionaran el període d'estudi. Com ja s'ha comentat anteriorment, l'onatge és generat, principalment, per l'acció del vent quan actua sobre la superfície del mar. Per tant, serà necessari disposar de dades meteorològiques (camps de vents) i d'onatge en diferents localitzacions de la zona d'estudi, per validar els resultats dels models. L'ideal seria poder tenir ambdós tipus de mesures de la mateixa localització, però això succeeix en poques ocasions.

D'altra banda, donat que els camps de vent forcen l'onatge (l'aspecte principal del present estudi), el següent pas serà obtenir-los. S'ha decidit utilitzar un model meteorològic per a obtenir camps de vent amb major resolució que la que faciliten els principals centres meteorològics i ambientals. Per a aconseguir aquesta millor resolució es realitza un procés d'anidament del model, partint de les dades generades pels models globals que utilitzen aquests centres. Més endavant es presentaran les diferents dades provinents de models globals.

Un cop validats els resultats del model meteorològic per als diferents dominis, aquests seran utilitzats en el model d'onatge. De la mateixa manera que en el model meteorològic, s'utilitzaran el mètode d'anidament de dominis per a obtenir resultats de major resolució, els quals seran posteriorment validats.

Els models meteorològics actuals solen utilitzar malles de càlcul amb elements de 3x3 km, o de grandària semblant. Per tant, per a facilitar les comparacions de resultats, s'ha decidit utilitzar el 3r domini del WRF (el de 3x3 km), per a les diferents configuracions del mateix. D'aquest anàlisi resultarà una configuració, que anomenarem òptima, del model meteorològic WRF, sobre la que es farà un anàlisi del comportament del model al realitzar l'anidament.

Un cop obtinguts tots els resultats del model meteorològic WRF es procedeix a forçar el model d'onatge SWAN, amb cada una de les configuracions del model WRF. Per acabar, els resultats del model d'onatge seran analitzats per tal d'obtenir conclusions respecte les millores en la simulació de l'onatge que pot donar l'ús de camps de vent d'alta resolució.

4.2. Dades: origen, format i qualitat

En aquest apartat s'exposen els diferents tipus de dades utilitzades per forçar el model meteorològic (provinents de diferents models globals), les dades de batimetria (necessàries per al model de generació i propagació d'onatge) i les dades provinents de diferents estacions/boies de mesura (amb les que es compararan els resultats). Addicionalment es parlarà de les dades generades per l'*Agència Estatal de Meteorologia* (AEMET), les quals s'han utilitzat com a referència a l'hora d'analitzar els resultats del model meteorològic.

4.2.1. Arxius dels models meteorològics globals

Les dades utilitzades per forçar el model meteorològic poden provenir de dos tipus de models diferents: models de prognosi, on es simula a futur a partir d'unes dades d'entrada; models de diagnosi (o reanàlisi), on es simula un període del passat, però amb unes dades corregides que ajusten millor els resultats.

En el present estudi s'han utilitzat dades (cada 6 h) provinents d'ambdós tipus de models dels principals centres meteorològics i ambientals del món:

- El *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), una branca del *National Weather Service* (NWS) de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dels Estats Units.
- L' *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), una organització intergovernamental independent europea recolzada per 34 països.

A la Taula 1 es mostren les diferents tipus d'arxius, el tipus de model d'on provenen i a quin centre pertanyen:

Taula 1: Tipus d'arxius utilitzats per forçar el model meteorològic, segons el model d'on resulten i el centre al qual pertanyen.

Arxiu	Nom	Centre	Model
GFS	Global Forecasting System	NCEP	prognosi
FNL	(Final) Operational Global Analysis		diagnòstic
ERA-Interim	ECMWF Re-Analysis	ECMWF	diagnòstic
EFIX	ECMWF Re-Analysis (Fixed)		diagnòstic

Pel que fa als arxius "EFIX", aquests són una modificació dels arxius "ERA-Interim". En els arxius "EFIX" s'ha modificat la màscara que defineix la línia de costa utilitzada en la variable SST (representant les Illes Balears, Creta i d'altres sistemes d'illes, les quals no apareixien amb la màscara dels arxius "ERA"), tal i com es representa en la Figura 9.

Una variable que s'ha demostrat que genera millores en la predicció meteorològica és la temperatura de la superfície del mar, *Sea Surface Temperature* (SST) en anglès, (Seo et al., 2006). Aquesta variable està inclosa en tots els arxius considerats, però la dels arxius GFS és de baixa qualitat, per tant, s'ha considerat afegir-la de manera externa (com a arxius independents).

Aquesta variable es facilita per dies, per a les 00:00, i es tracta com constant en tots els passos de temps de càlcul.

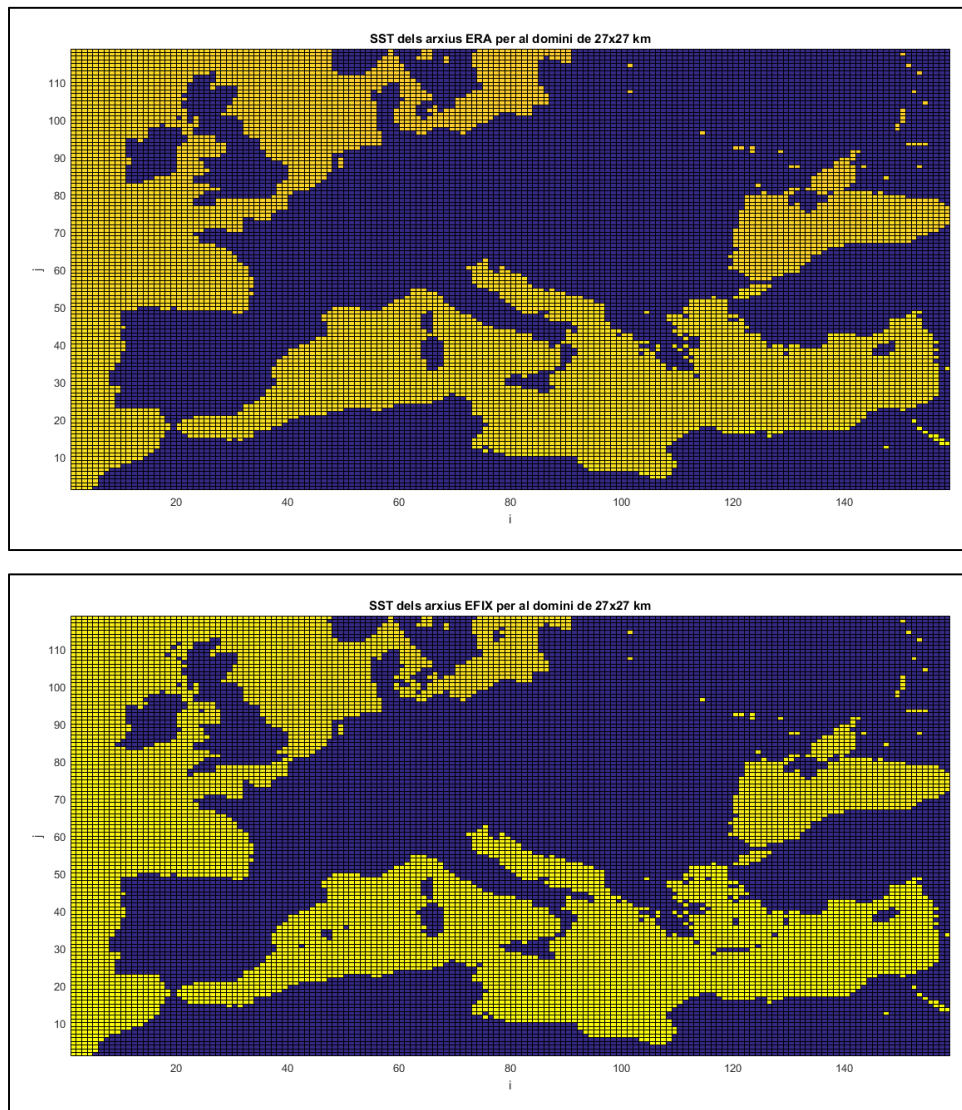


Figura 9: Mapa de la màscara de costa utilitzada en la variable SST dels arxius ERA-Interim (superior) i EFIX (inferior). [Font: pròpia].

4.2.2. Batimetria

La batimetria utilitzada prové del projecte GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) iniciat a principis del segle XX amb el Príncep Albert I de Mònaco entre els seus principals membres, fins a l'actual organització co-dirigida per *International Hydrographic Organization (IHO) Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC)* (de la UNESCO). Aquest projecte actualment facilita, entre d'altres serveis i productes, malles de batimetries de tot el món de resolució de 30 segons angulars des del 2014.

Les dades poden ser descarregades, en diferents formats (netCDF, ASCII, GeoTIFF) des de la pròpia pàgina web (<http://www.gebco.net>) seleccionant el domini desitjat (limitat a 90°x90°). Les dades s'obtenen a partir d'un model del terreny continu per a continents i oceans. Es genera combinant sondejos des de vaixells (amb control de qualitat) amb interpolacions entre punts de sondeig guiats per dades de gravetat derivades de satèl·lit. Cada millora que s'obté de les dades i/o els mètodes, s'introdueix en el producte.

El domini escollit per a la batimetria es compren entre els 5°O i 18°E, i entre els 35°N i 46°N.

4.2.3. Mesures en boies/estacions

Un element important per a comparar els resultats de les simulacions és disposar de dades mesurades en diferents localitzacions de l'àrea d'estudi. A la Figura 10 es representa la localització de les diferents boies/estacions considerades.

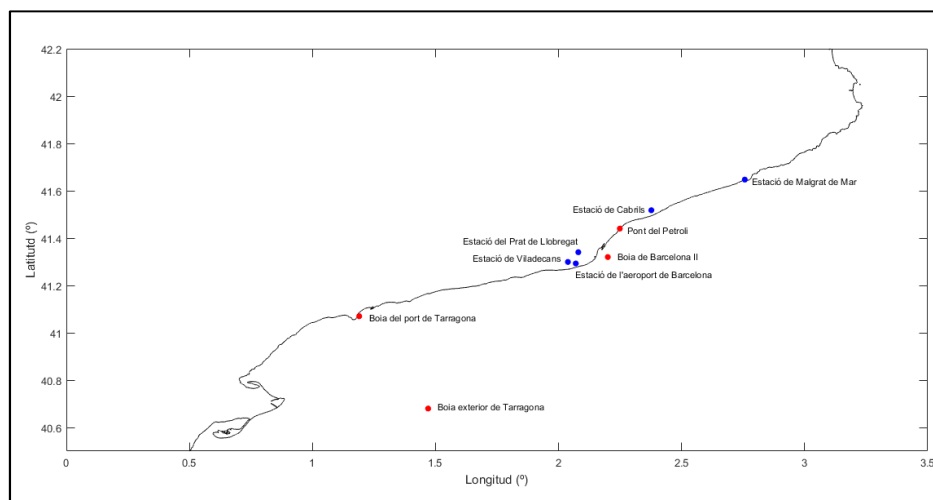


Figura 10: Mapa de la localització de les diferents estacions marítimes, boies i el Pont del Petroli, (vermell) i estacions meteorològiques (blau) de les que es disposen dades. [Font: pròpia].

En la Taula 2 es presenten les diferents localitzacions d'on es disposen mesures, incloent el tipus de dades de que disposa.

El 'Propietari' es refereix al grup al qual pertany la boia/estació corresponent. Aquests grups es poden classificar com:

- LIM és el Laboratori d'Enginyeria Marítima, de la Universitat Politècnica de Catalunya.

- REDEXT i REDCOS són les xarxes Exterior i Costanera, respectivament, de boies propietat de *Puertos del Estado* (Espanya).
- La NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), dels Estats Units, disposa de dades meteorològiques de sensors ASOS (*Automated Surface Observing System*).
- El SMC (Servei Meteorològic de Catalunya) és l'encarregat de gestionar la majoria d'estacions meteorològiques de Catalunya.

En la columna de 'dades disponibles' s'especifica el tipus de variables que s'obtenen en la boia/estació. El 'fondeig' fa referència a la profunditat a la que està ancorada la boia que correspongui, mentre que altura fa referència a la cota sobre el nivell del mar a la que es troba l'estació meteorològica que pertorqui.

Taula 2: Característiques de les localitzacions d'on es disposen mesures. ASM fa referència a Altura Sobre el Nivell del Mar. Entre parèntesis les variables considerades en el present estudi: vm és la velocitat mitjana del vent; dir és la direcció mitjana de procedència del vent; H_s és l'altura d'ona significant espectral; T_p és el període de pic i D_{md} és la direcció mitjana de procedència de l'onatge. [Font: pròpia].

Boia/estació		Dades Disponibles	Fondeig o ASM (m)	Longitud (°)	Latitud (°)
Nom	Propietari				
Pont del Petroli	LIM	Meteo (vm , dir) + onatge (H_s , T_p)	12	2.248986	41.44017
Boia de Tarragona (REDEXT)	<i>Puertos del Estado</i> (Espanya)	Meteo (vm , dir) + onatge (H_s , T_p , D_{md})	688	1.47	40.68
Boia de Barcelona II (REDCOS)		Onatge (H_s , T_p , D_{md})	68	2.2	41.32
Port de Tarragona (REDEXT)		Onatge (H_s , T_p , D_{md})	15	1.19	41.07
Aeroport de Barcelona	NOAA	Meteo (vm , dir)	6	2.07	41.2928
El Prat de Llobregat	SMC	Meteo (vm , dir)	8	2.08022	41.34045
Viladecans		Meteo (vm , dir)	3	2.03787	41.29928
Cabrils		Meteo (vm , dir)	8	2.37702	41.51773
Malgrat de Mar		Meteo (vm , dir)	2	2.75658	41.64707

A continuació s'exposarà cada tipus d'element de mesura, incloent els dispositius utilitzats per realitzar aquestes mesures, les variables més importants que mesura, el procés d'enregistrament de les dades i algun comentari sobre el control de qualitat que reben.

Les estacions meteorològiques prenen mesures del vent a 10 m d'altura, a excepció de la de Viladecans, que les pren a 2 m. D'altra banda, la boia de Tarragona (l'única amb dades meteorològiques), obté dades de vent a 3 m d'altura.

Per tant, per poder-les comparar amb els resultats de vent del model meteorològic, les mesures que no hagin estat preses a 10 m d'altura s'hauran de projectar a aquesta altura. Aquesta projecció s'ha realitzat seguint un perfil logarítmic (Kamphuis, 2010):

$$\frac{U_{10}}{U_z} = \left(\frac{10}{z}\right)^\alpha \quad (7)$$

On U_{10} és la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura, U_z la velocitat mitjana del vent a la cota z i α és un paràmetre empíric que té a veure amb la quantitat de turbulència atmosfèrica.

La turbulència atmosfèrica depèn de la velocitat del vent, la radiació solar i de la cobertura de núvols del cel. El vent incrementa la barreja vertical, eliminant les estratificacions i conduint l'estabilitat cap a unes condicions neutrals. Per a cels molt ennuvolats les condicions d'estabilitat es dirigeixen cap a la neutralitat (Pasquill, 1961). Com que en una tempesta les velocitats són elevades i el cel sol estar ennuvolat, es considera que l'estabilitat és neutral i, per tant, el paràmetre α pren el valor de 1/7.

4.2.3.1. Pont del Petroli

A la part central de la zona d'estudi hi ha present una estructura singular, el Pont del Petroli de Badalona (Figura 11) la qual està equipada amb instruments que permeten obtenir dades meteorològiques, oceanogràfiques i biològiques. La peculiaritat resideix en que aquests dispositius estan col·locats en un punt que fa de transició entre les mesures a

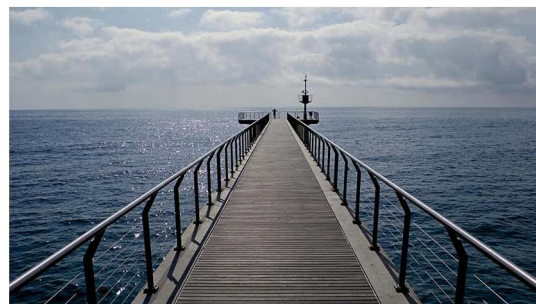


Figura 11: Imatge del Pont del Petroli i de l'estació de mesura (únicament es veu la part meteorològica, la oceanogràfica està submergida). [Font: Garcia, A.].

mar obert (captades per boies) i el que succeeix a la costa. És per això que aquests dispositius permeten la seva utilització com a plataforma científica per dur a terme estudis relacionats amb el canvi climàtic, energies alternatives, dinàmica del litoral, etc.

A continuació es presenta el format de les dades d'onatge, les quals són mesures instantànies i horàries. Les variables d'onatge mesurades són:

- L'altura d'ona significant espectral, **H_s** [m].
- El període pic, **T_p** [s].

Pel que fa a les dades meteorològiques, les mesures es prenen cada 10 min (com a mesures instantànies), per tant, es consideraran únicament les mesures que coincideixin amb les hores. Les variables meteorològiques més importants són:

- la velocitat mitjana, **vm** [m/s].
- La direcció mitjana de procedència, **dir** [°].
- La temperatura de l'aire a 2 m, **t_aire** [°C].
- La pressió atmosfèrica, **p_atm** [Pa].

D'altres variables mesurades en aquesta estació serien: la ràfega del vent, la humitat relativa, la precipitació, salinitat i temperatura de l'aigua.

4.2.3.2. Boies Xarxa REDEXT

Aquests tipus de boies estan fondejades a gran profunditat (més de 200 m de profunditat) per facilitar dades en condicions d'aigües profundes (no afectades pel fons ni la costa). Existeixen dos tipus de boies de la xarxa exterior: les Wavescan, les quals mesuren dades meteorològiques i d'onatge; i les SeaWatch (Figura 12), les quals, a més, mesuren variables oceanogràfiques (com els corrents).

Les boies estan equipades amb, a part dels sensors, de sistemes de procés, emmagatzemant i transmissió de dades. Internament, la boia calcula un conjunt de paràmetres estadístics de l'estat del mar i s'envien horàriament via satèl·lit. Al centre de control de *Puertos del Estado*, es realitza un segon conjunt de paràmetres estadístics, més ampli i independent dels algorismes de la boia.

Amb tot això, es realitza un control de qualitat de les dades, tant a temps real com en diferit. D'aquesta manera, es verifica que els valors obtinguts ho han estat en condicions de correcte funcionament, o bé, informa d'aquells valors anòmals o amb major incertesa.

Les variables d'interès es recullen a continuació, exposant-ne el període durant el qual es mesura:

1. Onatge (calculats sobre períodes de 26 minuts):

a) Paràmetres escalars:

- Altura Significant Espectral, **Hm0** [m].
- Període Mig Espectral, **Tm02** [s].
- Període de Pic, **Tp** [s].

b) Paràmetres direccionals:

- Direcció mitjana de procedència de l'onatge, **Dmd** [0° =N, 90° =E].

2. Meteorologia (Dades enregistrades a 3 m sobre la superfície)

- Velocitat mitjana del vent, **Vv_md** [m/s]. Mesures sobre períodes de 10 minuts.
- Direcció mitjana del vent, **Dv_md** [0° =N, 90° =E]. Mesures sobre períodes de 10 minuts.

Hi ha d'altres variables que podrien ser d'interès, però no s'inclouen perquè el punt central d'aquest estudi són els camps de vent i l'onatge. A més, s'evita d'aquesta manera transformar el treball en un estudi més complex.

4.2.3.3. Boies Xarxa REDCOS

En aquest cas, les boies estan col·locades en zones pròximes a ubicacions d'interès especial (com instal·lacions portuàries), fondejades normalment per sota els 100 m de profunditat. Aquestes dades estan pertorbades pel fons marí i per la morfologia de la costa i, per tant, donen informació local de llocs amb condicions semblants.

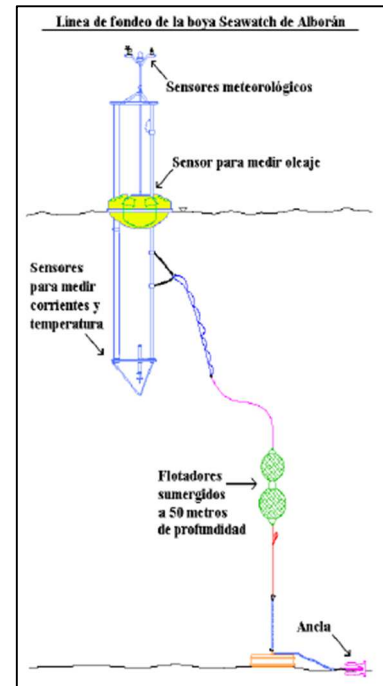


Figura 12: Línia de fondeig d'una boia Seawatch. [Font: Puertos del Estado].

Quan s'utilitzi aquesta informació (per a activitats portuàries, calibració i validació de models, etc.) s'ha de tenir en compte que les condicions siguin semblants a les de les mesures.

Actualment, la majoria d'aquestes boies estan equipades amb dispositius direccionals (com les boies Triaxys (Figura 13), les quals són del tipus de les de la nostra zona d'interès).

Aquest tipus de boia mesura altures del nivell del mar i realitza un procés de càlcul, quedant aquesta informació emmagatzemada a la pròpia boia. Ambdós tipus de dades són enviades per radio a temps real a estacions a la costa, on s'emmagatzemen i s'envien via mail a *Puertos del Estado* per a realitzar-hi un control de qualitat (com el que es realitza per les boies de la Xarxa REDEXT). Periòdicament, durant el manteniment de la boia, es recullen les dades emmagatzemades en ella i s'analitzen a *Puertos del Estado*. Aquestes dades recuperades són processades i qualificades per recuperar dades perdudes i ampliar la base de dades de la Xarxa.

En conjunt de dades que faciliten les boies de la Xarxa REDCOS (calculades totes elles sobre períodes de 24 minuts), distingint entre les escalars i direccionals, són:

- a) Onatge escalar:
 - Altura Significant Espectral, **Hm0** [m].
 - Període de Pic, **Tp** [s].
- b) Onatge direccional:
 - Direcció Mitjana de procedència de l'onatge, **Dmd** [0° =N, 90° =E].
 - Dispersió angular en tota la banda, **Ds** [$^{\circ}$].

Les boies direccionals inclouen tots els paràmetres, mentre que les escalars només consideren el primer grup de variables.

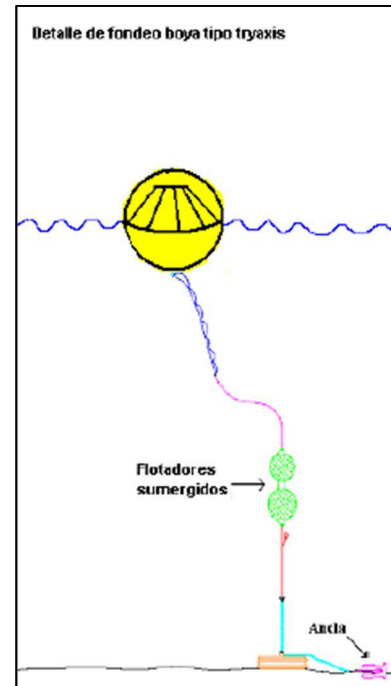


Figura 13: Esquema de fondeig d'una boia Triaxys. [Font: Puertos del Estado].

Les boies utilitzades (equipades amb dispositius AXYS) realitzen mostrejos durant 24 minuts, començant a l'hora en punt, amb una freqüència de 4 Hz. No obstant, les dades s'envien de forma horària.

4.2.3.4. Estació de l'Aeroport de Barcelona (tipus ASOS)

Aquest tipus d'estacions (*Automated Surface Observing System*) són una font primària de dades meteorològiques en superfície (dades en format METAR). Tal com indica el seu nom, l'obtenció, processament i transmissió de les dades es fa de forma automatitzada, reduint o eliminant la influència directa de les persones.

Aquest sistema disposa de 3 nivells de control de qualitat, depenent de l'escala temporal i espacial:

- Nivell 1 – Local: control a temps real, abans de transmetre la informació, a través d'algoritmes d'auto-diagnòstic i de control de qualitat, els quals utilitzen les dades directament de mesura. Les dades s'envien de manera programada.
- Nivell 2 – Àrea: control, realitzat per personal de la *Weather Forecast Office* (WFO), de sèries de dades més extenses (al voltant de 2 h des de la transmissió de les dades des del Nivell 1) i que abasten àrees de la mida d'un Estat. Evita o preveu errors addicionals i permet detectar on està aquest error i actuar en conseqüència.
- Nivell 3 – Nacional: control centralitzat de totes les dades METAR, realitzat per tècnics del *ASOS Operations and Monitoring Center* (AOMC). En aquest nivell s'intenta mantenir una uniformitat del sistema, evitant allargar problemes que el desestabilitzin, amb un control del voltant de 2 h des de la transmissió de les dades des del Nivell 2.

En el control de qualitat es comparen les dades METAR amb el resultat d'un camp de dades interpolades òptimament. Les variables més importants que s'avaluen són:

- Velocitat del vent (en nusos): mesurada amb anemòmetres del tipus «light chopper». Les mesures són valors mitjans cada 2 min, però només valors per sobre els 2 nusos. El rang de valors disponible està

entre 2 i 125 nusos, amb una resolució de 1 nus i una precisió de ± 2 nusos o d'un 5% (la major de les dues).

- Direcció del vent (en graus): s'obté en les mateixes condicions que la velocitat del vent (anemòmetre tipus «light chopper», mínima velocitat de 2 nusos, valors mitjans cada 2 min). El sensor permet obtenir valors entre 0 i 359 °, amb una precisió de $\pm 5^\circ$ (quan la velocitat és superior als 5 nusos) i una màxima resolució a les unitats.
- Temperatura potencial, per a calcular la Temperatura ambient (en °C): mesures amb sensors resistius (RTD) cada 5 minuts, a partir de valors mitjans de cada minut. Aquests sensors permeten obtenir mesures dins del rang [-80°F, 130°F], amb una resolució de 0.1°F i un error màxim de $\pm 3.6^\circ\text{F}$. Aquests graus són convertits a °C.
- Pressió atmosfèrica: mesures a través d'altímetres que mesuren polzades de mercuri. Els valors mesurats, minut a minut, es compreen entre 16.9 i 31.5 polzades de mercuri, amb una precisió de ± 0.02 polzades i una resolució de 0.003 polzades a la mesura i 0.005 al valor transmès.

Les dades que no estiguin en unitats del Sistema Internacional, hauran de ser convertides per a poder ser comparades. Les dades reportades (descarregades) tenen una cadència de 30 minuts. Per poder comparar amb les dades horàries, es consideraran els valors a les hores en punt.

4.2.3.5. Estacions del SMC

Les estacions del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) considerades són aquelles més properes a la costa central catalana (on està situat el Pont del Petroli) i de les quals es disposaven dades.

Les principals variables que mesuren, i que són d'interès per al present estudi són:

- Temperatura (en °C). El rang de valors es compreen entre -30 i 46 °C.
- Velocitat del vent (en m/s). Mesurada amb anemòmetres mecànics o d'ultrasons. Les velocitats que es poden captar són les que es situen entre 0.5 i 55 m/s.

- Direcció del vent (en °). Mesurada amb anemòmetres mecànics o d'ultrasons que permet captar totes les direccions (de 0 a 360 °).
- Pressió atmosfèrica (en hPa). Mesurada amb aparells piezoresistiu o capacitiu, el qual permet capturar valors entre 700 i 1060 hPa.

D'aquestes variables, menys la pressió atmosfèrica, es prenen valors secundals per a obtenir mitjanes minutals (de totes aquestes mesures). Aquesta mitjana ha de ser vectorial quan es tracta de la velocitat i direcció del vent.

Les dades de període són aquelles que s'emmagatzemen i es fan servir per fer els estudis. Aquestes són semi-horàries (valor mitjà dels últims 30 min) o horàries (valor mitjà dels últims 60 min).

Pel que fa a les dades de vent, es considera que el vent està en calma per a aquells valors inferiors a 0.5 m/s. En quant a la pressió atmosfèrica, aquesta està reduïda a nivell de mar.

El procés de control és un procés semiautomàtic per nivells, posterior a l'enregistrament, sempre sota control de personal tècnic la supervisió.

1. Control de completesa: primer es realitza un control que verifiqui que s'ha rebut l'emmagatzemant correctament les dades. En aquest nivell es podrien detectar problemes en el sistema de transmissió i/o emmagatzematge.
2. Filtres de rang: a partir dels rangs presentats anteriorment es poden detectar valors «irreals».
3. Control de coherència temporal: basant-se en la comparació d'un registre amb l'immediatament anterior, es poden detectar salts molt bruscos en l'evolució temporal d'una variable, o bé que aquesta es mantingui constant massa temps. Aquests factors poden indicar mesures errònies o fallides dels dispositius de mesura.
4. Control de coherència interna: conjunt d'algoritmes que permeten garantir la coherència de les mesures amb la realitat. Per exemple, que en un mateix interval de temps la temperatura no sigui més baixa que el valor mitjà.
5. Control de coherència espacial: a través de mapes, es poden observar aquelles estacions on el seu comportament difereix del comportament de les situades en climes semblants al seu. També s'utilitzen eines de teledetecció (satèl·lits, radars, etc) per fer aquesta verificació.
6. Control visual: un tècnic realitza gràfiques d'evolució temporal de totes les variables per detectar errors més subtils. Aquest control es realitza a banda dels esmenats anteriorment.

4.2.3.6. Dades de la AEMET

AEMET és l'Autoritat Meteorològica de l'Estat Espanyol i és el Servei Meteorològic Nacional, que s'encarrega de realitzar les prediccions meteorològiques, entre d'altres activitats, a l'estat espanyol.

Les prediccions que realitza AEMET a curt termini (fins 48 h) és fan en base a un Sistema de Predicció per Conjunts, SREPS, en àrea limitada de 25x25 km de resolució i 25 membres. Els membres els formen combinacions de 5 models numèrics (Hirlam, HRM, LM, MM5 i UM) forçats amb prediccions de 5 models globals diferents (CMC_GEM, DWD_GME, ECMWF_IFS, JMA_GSM i NCEP_GFS). Aquestes sigles estan recollides a la taula d'acrònims. Per a les prediccions a mig termini, AEMET postprocessa i utilitza les prediccions del Sistema global de Predicció per Conjunts (*Ensemble Prediction System*, EPS) del ECMWF, basat en pertorbacions de l'estat inicial atmosfèric i de les contribucions de les parametritzacions físiques del model.

Les dades disponibles per a aquesta tesina provenen de les prediccions del model Hirlam en dos dominis diferents: un domini gran euroatlàntic i un domini petit centrat a la Península Ibèrica. Utilitza 40 nivells en la vertical. Les variables d'interès són la velocitat del vent en les direccions longitudinal i de la latitud, tot i que els models que utilitza AEMET generen més variables. Les dades es donen cada 6 h en els dos dominis d'elements quadrats descrits a continuació:

- Domini gran:
 - 0.16° de resolució (aproximadament 16 km)
 - Comprés entre els meridians 6°O i 17.04°E; i entre els paral·lels 35°N i 45.08°N
- Domini petit:
 - 0.05° de resolució (aproximadament 5 km)
 - Comprés entre els meridians 0°E i 5°E; i entre els paral·lels 40°N i 43°N

Per a més informació sobre aquest centre, consultar a la web (<http://www.aemet.es>).

4.3. Període d'estudi

L'elecció del període d'estudi depèn de si es compleixen o no les condicions més comuns en la zona d'estudi, en aquest cas la costa catalana. Per condicions s'entén, per a l'interès de la present tesina, els patrons que segueixen els camps de vent i d'onatge. Gràcies a les dades recopilades durant 20 anys en diferents punts de la costa catalana (a través de la Xarxa d'Instrumentació Oceanogràfica i Meteorològica, XIOM), ha permès l'estudi del clima d'onatge en aquesta zona (García et al., 1993; Jimenez et al., 1997; Bolaños et al., 2004; Bolaños i Sánchez-Arcilla, 2006), especialment durant períodes de tempesta.

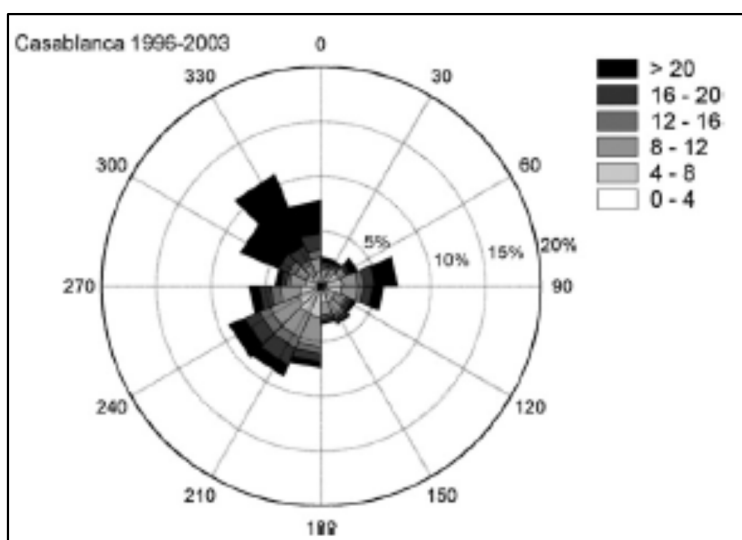


Figura 14: Rosa dels vents a la plataforma petrolífera de Casablanca entre els anys 1996 i 2003. L'escala de grisos representa la velocitat del vent (m/s). [Font: Bolaños et al., 2009].

D'aquests estudis es dedueix que els camps de vent a la costa catalana són molt heterogenis, però amb presència d'unes direccions principals provinents de l'E, NO i S. Aquest fet provoca que, tot i el *fetch* limitat existent en el Mediterrani Occidental, es puguin arribar a produir onatges generats pel vent que provoquin danys i afectacions importants durant episodis de tempesta.

Els principals factors que produeixen variacions importants del nivell del mar són els agents meteorològics (principalment els vents) i, en algunes zones, els efectes de ressonància amb badies i ports. En períodes de tempesta, l'augment del nivell del mar pot superar el metre, valors superiors als produïts per les marees. Els 20 anys de mesures han permès identificar la influència dels camps de vent, del flux provinent del riu Ebre i de la dinàmica a mar obert, sobre la dinàmica en les zones costaneres.

En el Mar Mediterrani, aquestes condicions de tempesta es solen considerar quan la velocitat del vent és elevada i es generen onades amb l'altura d'ona significant (H_s) superior als 2 m.

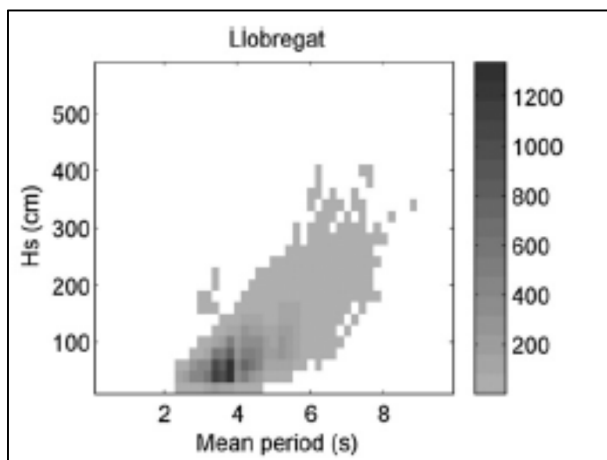


Figura 15: Distribució de l'altura d'ona significant (H_s) i període mitjà per a la boia XIOM de Llobregat. L'escala de grisos representa el número de casos. Informació agrupada en elements de 0.2s i 20 cm.. [Font: Bolaños et al., 2009]

A l'any 2013 es van produir diferents tempestes que van provocar seriosos danys a les costes, com una a inicis de març que va obligar a les autoritats a tancar algunes platges (Escriche, E.). Si s'observen les dades de vent i onatge, i es comparen amb la dinàmica típica del vent (Figura 14) i (Figura 15) onatge observats en Bolaños et al. (2009), es podrà comprovar com aquella tempesta és un bon fenomen a estudiar.

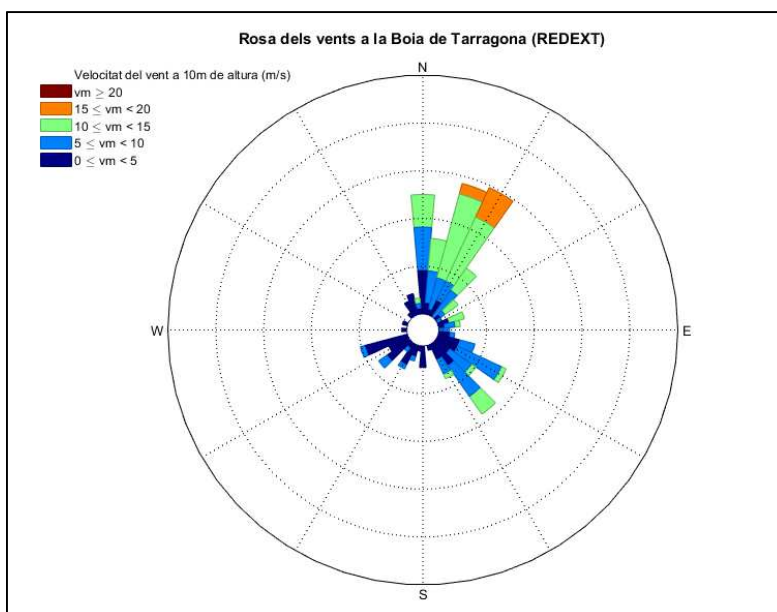


Figura 16: Rosa dels vents a la Boia exterior de Tarragona (REDEXT) entre el 25 de febrer del 2013 i el 6 de març del mateix any. [Font: pròpia, a partir de les dades de Puertos del Estado].

Les dades de vent i onatge del període entre el 25 de febrer del 2013 i el 6 de març del mateix any, provenen de la Boia de mar obert de Tarragona, molt a prop de la plataforma de Casablanca, (Figura 16) i de la boia de Barcelona (Figura 17), respectivament. Aquestes dades han estat facilitades per *Puertos del Estado*.

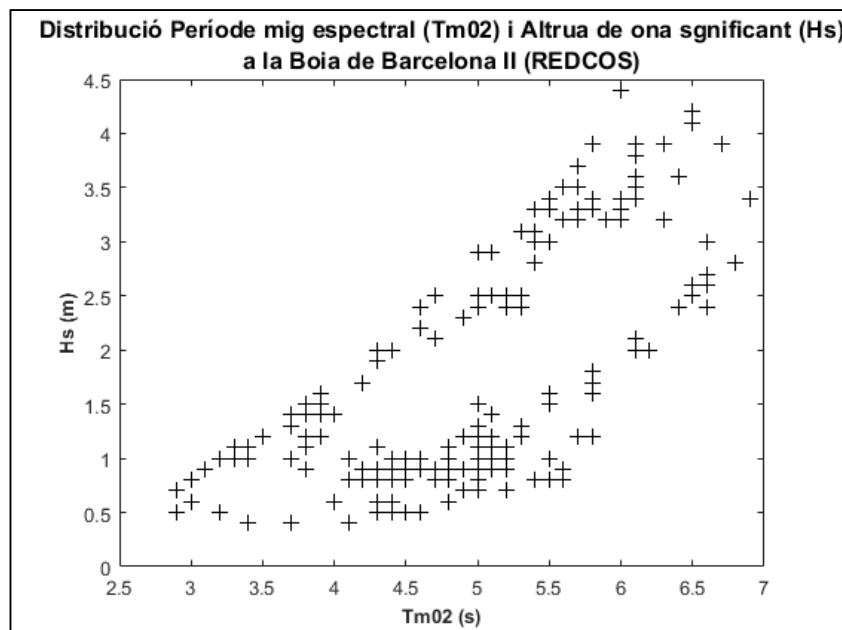


Figura 17: Distribució de l'altura d'ona significant (H_s) i el període mig spectral (T_{m02}) a la Boia de Barcelona II (REDCOS). [Font: pròpia, a partir de les dades de Puertos del Estado].

Pel que fa al vent, en aquest període, al mar davant la costa tarragonina, predominen vents de component N-NE, mentre que els vents més intensos mesurats a la plataforma de Casablanca provenen del N-NO. No obstant, les velocitats més elevades concorden en magnitud (superior als 15 m/s). S'ha de tenir en compte que la direcció del vent i l'onatge a mar obert és més variable que a zones costaneres per no (o no massa) està influenciats per la orografia ni la costa.

D'altra banda, l'onatge segueix una distribució del període mig spectral i d'altura d'ona significant semblant a les de la XIOM: períodes d'entre 2 i 5 s per a altures inferiors a 1 m, assolint altures d'ona significant entre 3 i 4 m per períodes superiors a 6 s.

Per tant, aquest període, entre el 25 de febrer del 2013 i el 6 de març del mateix any, es presenta com a un bon període d'estudi per a aquesta tesina.

Els models considerats són models mecanicistes i funcionals, és a dir, basats en coneixements científics (es coneixen, almenys una part, els processos involucrats en els fenòmens a estudiar) i que utilitzen certs paràmetres provinents de dades experimentals per adaptar-los a casos reals. Aquests paràmetres solen estar establerts a partir d'estudis anteriors.

4.4. Model meteorològic: sistema WRF-ARW

4.4.1. Introducció

En aquest apartat es presentaran les principals característiques d'aquest model i la configuració escollida per a obtenir els camps de vents necessaris per forçar el model d'onatge. El model meteorològic utilitzat és el model WRF en particular, el seu sistema *Advanced Research WRF*, el qual està estès arreu del món i disposa d'una àmplia comunitat d'usuaris. És un model flexible i d'avantguarda, que permet realitzar simulacions en paral·lel, permetent reduir una part important dels recursos computacionals i temporals que requereixen.

A més, el model té la capacitat per treballar segons el mètode dels anidaments, amb el que s'augmenta la resolució dels dominis d'una manera progressiva per a evitar inestabilitats numèriques. D'aquesta manera, es poden obtenir resultats en zones més petites (escala regional) amb una certa variabilitat espacial que s'adapti millor a la física d'aquests entorns més reduïts i complexos. En aquest cas, es recomanar no assolir resolucions inferiors a 1x1 km.

El ventall d'aplicacions en que és utilitzat va des de la parametrització de les condicions meteorològiques d'un cert escenari fins al seu ús en models acoblats, passant per la predicció i l'anàlisi climàtic. En totes elles es consideren escales espacials globals, de mesoescala o inclús microescala.

4.4.2. Estructura del model

El sistema WRF-ARW està estructurat en diferents mòduls (Figura 18), els quals estan compostos de diferents mòduls de càlcul, que transformen la informació d'entrada de tal manera que el model la pugui fer servir per a, després, generar

sortides fàcils d'utilitzar per als usuaris. Aquests blocs estan formats, principalment, de la següent manera:

- 1) *WRF Pre-processing System (WPS)*: en aquest bloc es defineixen es dades per inicialitzar les simulacions del model, tant en escala temporal com espacial.
 - a) 'geogrid.exe' defineix el domini del model i crea els arxius estàtics (no varien amb el temps) amb dades tererstre.
 - b) 'ungrib.exe' converteix de format les dades meteorològiques d'entrada (en format GRIB), provinents de models globals, en un format intermedi.
 - c) 'metgrid.exe' interpola horitzontalment les dades meteorològiques sobre les dominis establerts.
- 2) *WRF*: és el mòdul que pròpiament realitza els càlculs físics.
 - a) 'real.exe' interpola verticalment sobre les coordenades del model, creant condicions inicials i de contorn.
 - b) 'wrf.exe' realitza els càlculs físics, generant les prediccions.

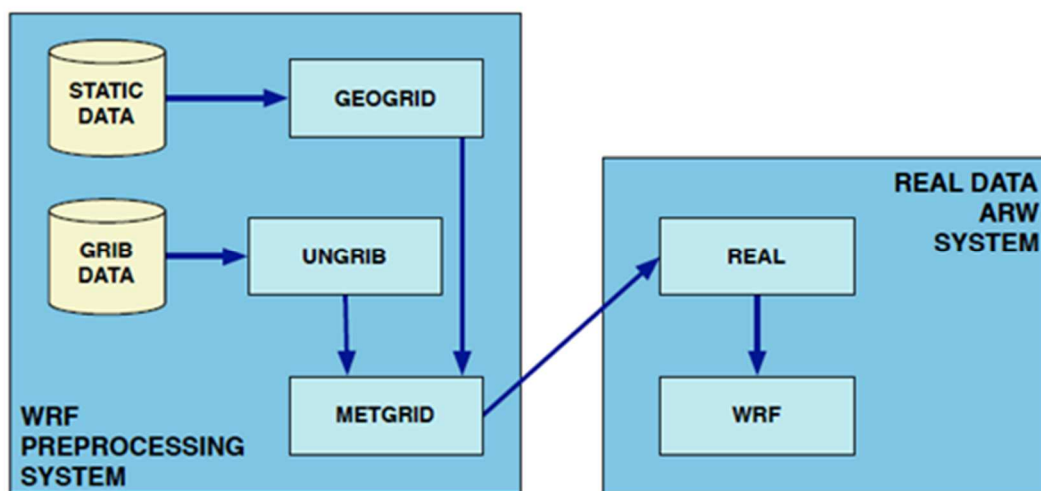


Figura 18: Esquema del flux de càlcul de les components del mòdul WPS i com aquest alimenta, com a dades inicials, al sistema ARW. El text en les caixes rectangulars indica el nom del programa que s'utilitza en cada moment. [Font: Skamarock et al., 2008].

Per altra banda, existeixen diferents opcions per realitzar les simulacions, agrupades en dues classes: una primera opció que s'inicia a partir de dades idealitzades (casos ideals) i una segona que ho fa a partir de dades reals (casos reals).

En les cases en que s'utilitza l'anidament, els dominis es poden comunicar de dues maneres diferents, segons es transmeti la informació entre dominis anidats (Figura 19): un primer, '1-way', que realitza els càlculs en una sola direcció (del domini més groller al més fi); i un segon, '2-way', que té la capacitat de retroalimentar-se entre dominis.

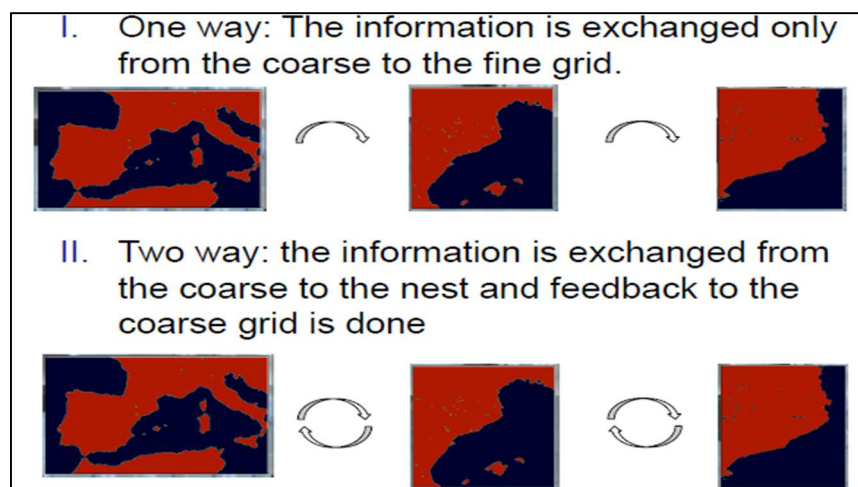


Figura 19: Esquema dels fluxos d'informació entre dominis segons el '1-way' (I) i el '2-way' (II).
[Font: Soret et al., 2011].

4.4.3. Equacions de govern i parametrització de la PBL

Els fenòmens meteorològics són fenòmens molt complexos que necessiten de molts paràmetres, variables i equacions per descriure'ls. En aquest apartat, el treball es centrarà en exposar les principals equacions per al present estudi: les equacions d'Euler (en format de fluxos) i la parametrització de la *Planet Boundary Layer* (PBL), la qual, si s'utilitza, desactiva la difusió vertical, ja que s'assumeix que la PBL inclourà aquest procés.

La dinàmica del sistema WRF-ARW es resol integrant les equacions compressibles i no hidrostàtiques d'Euler. Les equacions estan representades

en forma de flux utilitzant variables de propietats conservatives, seguint la filosofia d' Ooyama (1990).

4.4.3.1. Equacions d'Euler

$$\partial_t U + (\nabla \cdot \mathbf{V} u) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_\eta(p\phi_x) = F_U \quad (8)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot \mathbf{V} v) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_{n\eta}(p\phi_y) = F_V \quad (9)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot \mathbf{V} u) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (10)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot \mathbf{V} \theta) = F_\Theta \quad (11)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (12)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(\mathbf{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0 \quad (13)$$

afegint-ne a aquestes equacions d'Euler, la relació de l'invers de la densitat:

$$\partial_\eta \phi = -\alpha \mu \quad (14)$$

i l'equació d'estat:

$$p = p_0(R_d\theta/p_0\alpha)^\gamma \quad (15)$$

on els subíndexs x, y i η es refereixen respecte a la coordenada que s'està derivant.

μ representa la massa per unitat d'àrea en la columna en la posició (x,y) del domini del model. \mathbf{V} representa els fluxos de la velocitat en les 3 direccions (U, V i W). Θ és el flux de la temperatura potencial (θ). També apareixen en les equacions de govern les variables no conservatives: el geopotencial (ϕ), la pressió (p) i l'invers de la densitat (α). \mathbf{F} representa la força en la direcció que marqui el subíndex (U, V, W o Θ).

El sistema WRF-ARW permet projectar aquestes equacions sobre coordenades esfèriques segons diferents projeccions: Lambert conformal, polar estereogràfica, Mercator i la projecció latitud-longitud. Aquestes projeccions es descriuen en Haltiner i Williams (1980). Una altra possibilitat del sistema WRF-ARW és la

d'utilitzar variables perturbades pe reduir l'error de truncament i el d'arrodoniment (Skamarock et al., 2008).

4.4.3.2. Parametrització de la PBL

La PBL és la part més baixa de l'atmosfera (entre la superfície terrestre i 1-2 km d'altura) i està influenciada pel contacte amb la superfície terrestre. Els processos que es produeixen a la superfície i a la PBL determinen les interaccions entre les diferents capes de l'atmosfera i la superfície terrestre, en termes de calor, aigua, gasos, vents, etc. La *Planetary Boundary Layer* (PBL) és la responsable dels fluxos verticals (a escala *sub-grid*) ocasionats pel transport turbulent en la columna d'aire, on el vent va perpendicular a les isòbares, i, per tant, és la capa de mescla . Per sobre la PBL, a la zona d'*atmosfera lliure*, el vent és aproximadament geostrofí (paral·lel a les isòbares). La separació entre aquestes capes es dona lloc a la *Entrainment Layer* (o capa d'inversió), la qual és la part superior de la PBL, entre la cota 70% i la 100% de la seva altura. L'altura de la PBL depen molt de la localització, l'hora del dia, el vent, etc. podent variar des de unes desenes de metres fins varis centenars. A continuació es presenten les principals característiques (Taula 3) de dues de les paràmetritzacions de la PBL més utilitzades, les quals són les que s'han considerat en el present treball: la Yonsei University (**YSU**; Hong et al., 2006) i la Mellor-Yamada-Janjic (**MYJ**; Janjic, 1990, 1996, 2002).

Taula 3: Opcions de la Planetary Boundary Layer. [Font: Skamarock, 2008].

Scheme	Unstable PBL Mixing	Entrainment treatment	PBL Top
MRF	K profile + countergradient term	part of PBL mixing	from critical bulk Ri
YSU	K profile + countergradient term	explicit term	from buoyancy profile
MYJ	K from prognostic TKE	part of PBL mixing	from TKE

La parametrització segons **YSU** (Hong et al., 2006) és la següent generació de les parametritzacions *Medium Range Forecast* (MRF, Hong and Pan, 1996). La diferència entre la formulació YSU i la formulació MYJ és la manera de calcular l'altura de la PBL i que la primera considera un terme específic per a la capa d'inversió.

Tot el que s'ha explicat sobre el sistema WRF-ARW és una petita introducció, ja que no entra dins del present estudi aprofundir en aquests aspectes. Per a més informació sobre les variables, les discretitzacions, les equacions o algun altre aspecte científicotècnic, consultar el document tècnic sobre el sistema WRF-ARW (Skamarock et al., 2008).

4.4.4. Discretització

En aquest apartat s'explicarà, de manera molt simplificada, com es discretitza el domini horitzontal del model, quina és la discretització temporal de les equacions i quina és la coordenada vertical amb la que treballa el model WRF. A més, també s'exposaran les principals variables per als càlculs físics.

4.4.4.1. Discretització horitzontal

L'estructura de la malla de càlcul que utilitza el model WRF és la mateixa que l'esquema d'Arakawa C (Arakawa et al., 1977). En la Figura 20 es mostra un exemple de discretització del domini horitzontal (esquerre) i vertical (dreta), mostrant la disposició de les diferents variables en el domini.

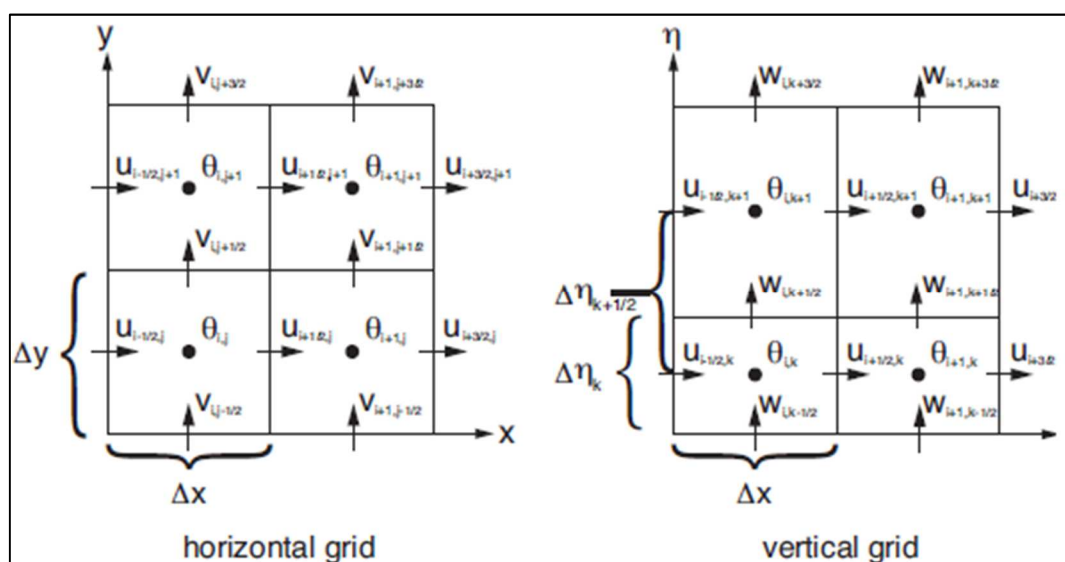


Figura 20: Discretització del domini segons una malla Arakawa C. Apareixen les components horitzontals de la velocitat ("U" i "V") i les variables termodinàmiques ("theta").
[Font: Skamarock, 2008].

En aquesta discretització, les velocitats ("U", "V" i "W") es calculen al centre dels laterals dels elements de la malla i en direcció normal als laterals, anomenats punts u, v i w, respectivament. Per altra banda les variables de

massa/termodinàmiques/químiques/escalars es calculen als punts de massa (“ θ ”), al centre dels elements de la malla, on els valors de les variables són valors mitjans de tot l’element. El geopotencial (“ Φ ”) es calcula als punts w. Les variables de barreja (“ q_m ”) i la resta de variables de diagnosi (pressió “ p ” i invers de la densitat “ α ”) es calculen als punts de massa.

4.4.4.2. Coordenada vertical i variables

Les variables es formulen utilitzant una coordenada vertical de massa *terrain-following* i s’obté en base a la pressió hidrostàtica (Laprise, 1992). A continuació es defineixen la coordenada vertical esmentada, denominada per η :

$$\eta = (p_h - p_{ht})/\mu \quad (17)$$

$$\mu = (p_{hs} - p_{ht}) \quad (16)$$

on p és la pressió i els subíndexs h , ht i hs indiquen pressió hidrostàtica, al contorn superior i a la superfície, respectivament.

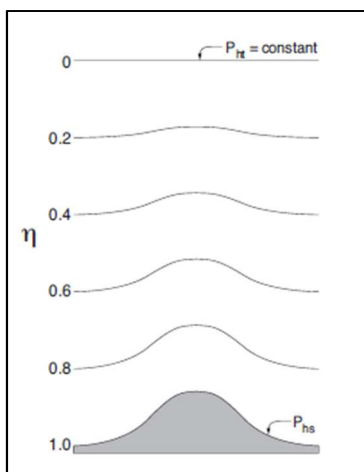


Figura 21: Representació de la variable η del ARW. [Font: Skamarock et al., 2008].

En el contorn superior η pren un valor de 0 i a la superfície assoleix el valor d’1 (Figura 21). Com ja s’ha explicat, μ representa la massa per unitat d’àrea en la columna en la posició (x,y) del domini del model, per tant, a partir d’ella es calculen els fluxos de la velocitat en les 3 direccions (\mathbf{V}), de la velocitat en la direcció vertical (Ω) i de la temperatura potencial (Θ). També apareixen en les equacions de govern les variables no conservatives: el geopotencial (Φ), la pressió (p) i l’invers de la densitat (α).

4.4.4.3. Discretització temporal

El sistema WRF-ARW utilitza un esquema d’integració *time-split*, on per als modes de menys freqüència (meteorològicament menys significants) s’utilitza un esquema d’integració de Runge-Kutta de 3r ordre, mentre que per a aquelles de major freqüència s’utilitza un esquema que, en el conjunt, mantingui l’estabilitat

numèrica. Per al mode de propagació acústica i les ones de gravetat s'utilitza un esquema d'integració *Forward-Backward* i, per a la propagació acústica en la direcció vertical i les oscil·lacions de flotació s'utilitza un esquema implícit.

4.4.5. Configuració del model WRF

Com ja s'ha exposat anteriorment, els factor principals que s'analitzaran seran els *inputs* de vent i la parametrització de la PBL. Per a cada combinació d'aquest factors s'han realitzat simulacions amb el model WRF utilitzant el mètode dels anidaments. El model WRF disposa de moltes configuracions possibles, però en aquest estudi s'ha considerat realitzar les simulacions segons l'opció *real*, ja que estem estudiant un cas real, no *ideal* (fictici). La comunicació entre domini ses realitzarà segons el '2-way', ja que és més fàcil d'utilitzar i perquè genera *feedbacks* entre dominis.

Primer de tot, s'exposen els acrònims utilitzats en el present treball per a cada un dels conjunts de model global i parametrització de la PBL utilitzats (Taula 4).

Taula 4: Nomenclatura de cada una de les configuracions del model meteorològic utilitzades en el present estudi. [Font: pròpia].

Nomenclatura	Model Global	PBL
FY	FNL	YSU
FM		MYJ
GY	GFS + SST	YSU
GM		MYJ
EY	ERA-Interim	YSU
EM		MYJ
EFIXY	EFIX (ERA-Interim Fixed)	YSU
EFIXM		MYJ

Pel que fa als dominis (Figura 22), partint del model global, s'han anidat obtenint els dominis presentats a la Taula 5.

Altres paràmetres que s'han configurat igual per a tots els dominis són:

- Longitud i latitud del centre del domini 1 = 15° i 45°, respectivament
- N° elements en la vertical = 30

- Rati dominis pare/niu = 3
- Rati interval de pas pare/niu = 3
- Mapes projectats segons la projecció cònica de Lambert (típicament utilitzada en latituds centrals)

Taula 5: Configuració dels dominis del model WRF. [Font: pròpia].

<i>Domini</i>	<i>Zona</i>	<i>Resolució del domini</i>	<i>Resolució de les dades geogràfiques</i>	<i>Nº elements en longitud</i>	<i>Nº elements en latitud</i>	<i>Posició origen domini (i,j)</i>
1	Mar Mediterrani	27x27 km	90' + 2'	160	120	(1,1)
2	Mar Mediterrani Occidental	9x9 km	2'	241	139	(16,12)
3	Mar Balear i Costa Catalana	3x3 km	30"	193	193	(56,54)
4	Costa Catalana	1x1 km	30"	259	274	(44,66)

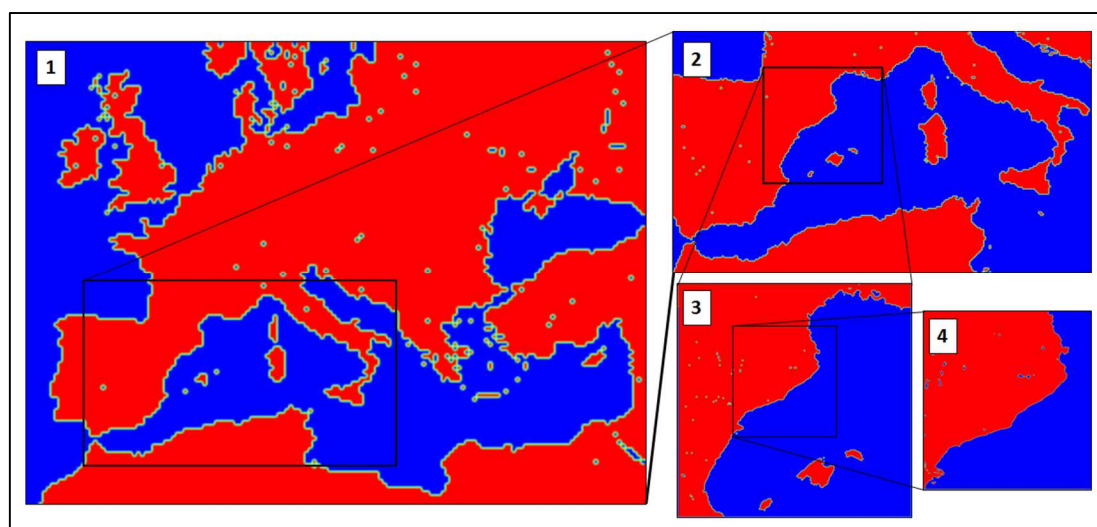


Figura 22: Representació dels dominis utilitzats en el model meteorològic WRF: (1) Mar Mediterrani, 27x27 km de resolució; (2) Mar Mediterrani Occidental, 9x9 km de resolució; (3) Mar Balear i Costa Catalana, 3x3 k de resolució; (4) Costa Catalana, 1x1 km de resolució. [Font: pròpia].

Els usos del sòl, els quals defineixen la línia de costa, utilitzats són els de Corine (*Coordination of Information on the Environment*), de la Agència Europea del Medi Ambient. Els mapes dels usos del sòl es faciliten a una escala 1:100 000.

Si el model dóna problemes, es passen a utilitzar els usos el sòl del USGS, que són els que té per defecte el WRF.

Per a realitzar els càlculs d'una forma més eficient s'ha escollit fer simulacions diàries (24 h) per als 9 dies d'estudi. A més, per les millores que suposa, s'ha decidit aplicar un temps d'escalfament de 12 h a l'inici de cada simulació, per a establir numèricament el model i així generar resultats fiables en els instants que siguin d'interès. Per tant, les simulacions diàries seran en total de 36 h (12 h d'escalfament + 24 h d'obtenció de resultats). A la Figura 23 es mostra un esquema del procés de simulació.

S'obtiniran resultats amb resolució temporal d'1h al llarg de tot el període d'estudi, que va del 25 de febrer del 2013 a les 00:00 fins al 6 de març del 2013 a les 04:00. A l'hora d'escollir les dades resultats de les simulacions, sempre s'escolliran les corresponents a la simulació que no estiguin, en aquell instant de temps, en el període d'escalfament. És a dir, el resultat del **Dia 2** a les 20:00 seran els que sortin de la simulació del **Dia 2** i no de la simulació del **Dia 3**, la qual comença a les 12:00 del **Dia 2**.

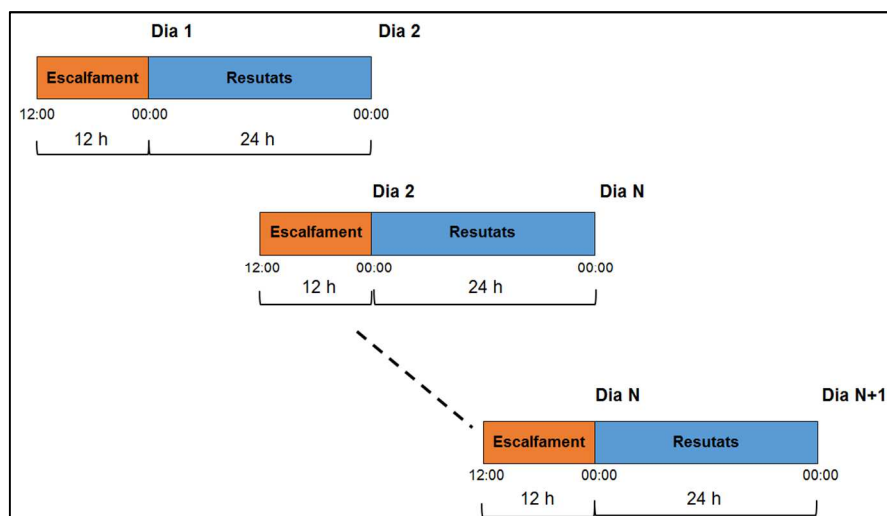


Figura 23: Esquema del procés de simulació, dia a dia amb escalfament de 12h (tram taronja) i obtenció de resultats les 24h del dia (tram blau).
[Font: pròpia].

Per a simplificar el procés d'anàlisi s'ha decidit fer una primera comparació dels resultats a partir de les sortides del domini 3 del model WRF (de 3x3 km de resolució). S'ha escollit aquest domini perquè la seva resolució s'aproxima a les resolucions més utilitzades per a estudis o prediccions a escala local (com és el cas d'AEMET que el domini de major resolució és el de 5 km). Els resultats que es compararan seran els *outputs* per cada una de les configuracions (*input de vent* i parametrització de la PBL) utilitzades.

A partir d'aquesta de la configuració que millor s'aproximi a les mesures de diferents punts de la costa catalana, es realitzarà un anàlisi de l'anidament per tal d'observar l'evolució dels resultats meteorològics a l'augmentar la resolució del domini espacial i de les dades de vent. La configuració i domini (per tant, resolució) que millor s'ajusti a les mesures, se l'anomenarà configuració òptima del model WRF per a la costa catalana.

L'extracció de les dades en les localitzacions desitjades (on hi ha present una estació o una boia) s'ha fet considerant el node de càlcul més proper a aquesta localització, és a dir, a partir de la distància mínima entre estació/boia i node de càlcul.

4.5. Model de generació i propagació d'onatge: model SWAN

4.5.1. Introducció

El model SWAN ha estat dissenyat a la Facultat d'Enginyeria Civil i Geociències de la Universitat de Tecnologia de Delft, Holanda. Tal i com ja s'ha introduït en apartats anteriors (2.3. Estudis previs), aquest és un model *Phased-averaged* de 3a generació ben adaptat per poder simular l'onatge en zones costaneres (Ris et al., 1999), tot i que també es capaç de simular a majors escales i mar obert. És per això que el seu ús està estès arreu del món.

El model SWAN també ha estat dissenyat per a poder aplicar el Mètode dels Anidaments i així obtenir camps d'onatge de major resolució (a escales costaneres), especialment en costes de morfologies i batimetries complexes.

4.5.2. Estructura del model

El model SWAN funciona a partir d'arxius d'ordres (extensió '.swn') on es recullen, d'una manera concreta, els passos que segueix el model per a realitzar les simulacions. A continuació es presenten els blocs més importants, dins d'aquesta línia d'ordres:

- 1) “**HEADING**”: on s’estableixen el nom del projecte, la convenció de l’onatge (Cartesiana, Nàutica o Curvilínia), el tipus de càlcul (estacionari o no) i el sistema de coordenades (Cartesianes o Esfèriques).
- 2) “**MODEL DESCRIPTION**”: on es defineix la malla de càlcul, els *inputs* del model (batimetria, corrents i camps de vent principalment), les condicions de contorn i inicials, els paràmetres físics i el mètode de resolució numèrica.
- 3) “**OUTPUT REQUESTS**”: on es configura com s’extrauran els resultats (matrius, localitzacions concretes, etc).
- 4) “**LOCK-UP**”: on s’ordena al model que calculi.

Un factor important del model SWAN és que representa explícitament (com en tots els models de 3a generació) els processos de generació causats pel vent, el *whitecapping*, les interaccions no lineals quàdruples i la fricció amb el fons (Booij et al., 1999). A més, a diferència d’altres models de 3a generació, el SWAN inclou termes d’interacció no lineals tríades i de trencament de fons. Tots aquests termes, i la seva configuració s’estableixen en el bloc **MODEL DESCRIPTION**, apartat de **physics**. En aquells paràmetres que no s’introdueixi explícitament la parametrització del procés o el valor d’algun dels seus paràmetres, el model SWAN utilitzarà aquells que tingui per defecte.

En el cas del model SWAN, tot i poder anidar diferents dominis, no es permet el *feedback* entre dominis anidats que sí permet el model WRF (amb el mètode ‘2-way’).

4.5.3. Equacions de govern

El SWAN es basa en resoldre l’equació espectral del balanç de l’acció (per a coordenades cartesianes, equació 18). N (equació 17) és la densitat d’acció, la qual es conserva en presència de corrents (cosa que no fa l’energia):

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (17)$$

on E és la densitat d’energia i σ la freqüència relativa.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (18)$$

on c és la velocitat de grup en cada una de les direccions (x , y , σ i θ), θ és la direcció de l'onatge i σ la freqüència relativa. Les direccions x i y defineixen el domini espacial, mentre que les direccions σ i θ defineixen el domini espectral.

A la part esquerra de la equació 18 el primer terme representa els canvis locals de N en el temps, el segon i el tercer representen el *shoaling* (quant l'onatge es propaga cap a aigües poc profundes i rep la influència del fons), el quart terme representa els canvis que les corrents generen en la freqüència relativa i el cinquè representa la refracció i difracció.

Per altra banda, el terme independent de la dreta (S) de la equació 18 representa el terme font, en termes de densitat d'energia, que té en compte els processos de generació i dissipació de l'onatge, així com les interaccions no lineals entre diferents onades:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (19)$$

on les subíndexs 'in', 'nl' i 'ds' indiquen els processos de transferència del vent a les onades, interaccions no lineals entre onades (quàdruples i tríades) i la dissipació (*whitecapping*, fricció amb el fons i trencament). En la 3a generació del model SWAN (*Cycle III* versió 41.10), per defecte només es consideren les físiques corresponents a l'onatge generat per vent, les interaccions quàdruples i el *whitecapping*.

Quan es parla d'interaccions no lineals es fa referència a les condicions de ressonància entre les diferents onades en aigües profundes, modificant l'espectre de l'onatge. Al ser un terme no lineal, genera dificultats computacionals i, per tant, es sol simplificar o aproximar. L'aproximació més comunament utilitzada per a les interaccions de quàdruples, tot i ser una aproximació pobre per a onades amb grans crestes i resolucions de les freqüències que es desvien més del 10%, i que pot donar problemes quan s'inclouen corrents, és la DIA (Hasselmann et al., 1985).

La dissipació fa referència a la pèrdua d'energia per alguna de les següents causes:

- Fricció amb el fons → a causa de la variabilitat (en morfologia i en material) del fons marí, es solen utilitzar versions simplificades d'aquests processos.
- Trencament → a l'aproximar-se a la costa, l'onatge guanya altura d'ona a causa del *shoaling* (pèrdua de profunditat), provocant el trencament de la onada (i per tant, una gran dissipació d'energia) quan l'altura esdevé massa gran.
- *Whitcapping* → és la pèrdua d'energia quan l'onada trenca en aigües profundes. Procés simulat segons Komen et al. (1984).

Com ja s'ha comentat anteriorment, el vent és el principal forçador de l'onatge. Aquest forçament succeeix a partir d'una transferència d'energia del vent a les onades, generant que l'altura d'ona augmenti. Segons Miles (1957), la pressió de l'aire a la superfície de l'aigua assoleix màxims a la cara posterior de la cresta de l'onada i un mínim en la part anterior. D'aquesta manera, el vent empeny l'aigua per darrer i l'estira per davant (Figura 24), produint-se aquesta transferència d'energia.

A més dels processos físics esmentats, el model SWAN és capaç d'incloure en els càlculs els efectes de la difracció, la reflexió i la transmissió, així com considerar la presència de vegetació i/o obstacles.

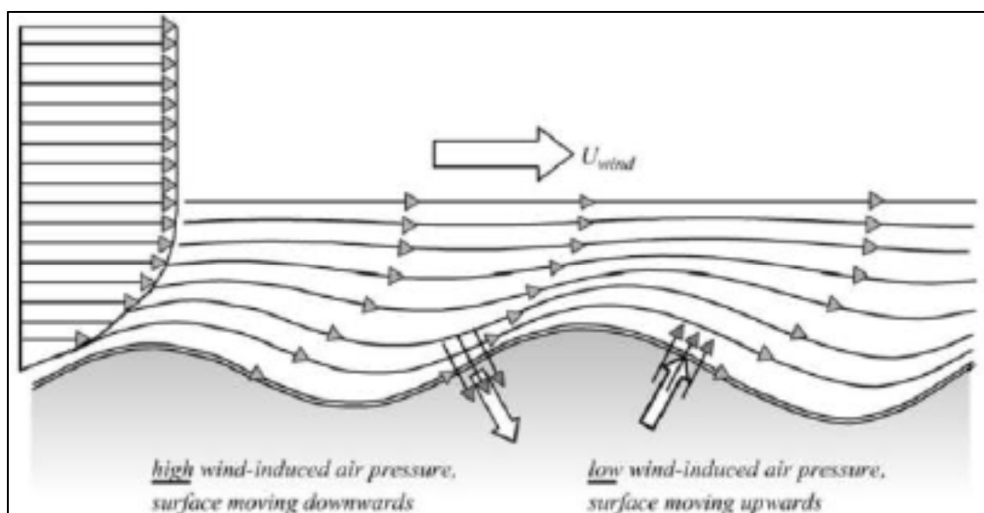


Figura 24: Variació de la pressió del vent actuant sobre una onada. [Font: Holthuijsen, 2007].

4.5.4. Discretització

El model SWAN treballa amb una discretització en diferències finites. L'espai físic es divideix en elements rectangulars de costats (Δx i Δy , en les direccions x i y , respectivament). L'espai espectral es divideix en elements de resolució direccional $\Delta\theta$ constant i resolució de la freqüència relativa $\Delta\sigma/\sigma$ constant (resultant en una distribució logarítmica de la freqüència). Per tant, l'espai estarà dividit en N_x , N_y , N_θ i N_σ nodes de càlcul, en les direccions x , y , θ i σ , respectivament, localitzant les coordenades dels nodes segons els índexs (i,j,l,m) . La discretització temporal es fa en base a la tècnica implícita d'Euler, establint l'instant en el temps amb l'índex n , sent l'interval de pas Δt . Cal esmentar que les posicions entre dos nodes de càlcul s'indexen amb índexs mitjos (p.e. $i-1/2$).

4.5.4.1. Discretització espacial

SWAN té implementats tres esquemes diferents per a discretitzar l'espai: un esquema de primer ordre (BSBT) i dos de segon ordre (SORDRUP i S&L). A continuació es presenta únicament l'esquema de primer ordre, el qual s'utilitza per defecte en càlculs no estacionaris. A més, en certes situacions, com zones costaneres o amb l'aparició d'obstacles, els esquemes de segon ordre es substitueixen per el BSBT

BSBT (*Backward Space, Backward Time*) és esquema de primer ordre cap a aigües amunt (*upwind*), que combina la discretització temporal i espacial. És un esquema separat dimensionalment, monòton i compacte, però no òptim en termes de difusió numèrica creuada. És important remarcar que aquest esquema està aplicat al flux d'energia (no a la densitat d'energia). Per tant, és un esquema que conserva el flux, que és necessari per al *wave shoalin*, i que permet aplicar el Mètode del *Sweeping* (apartat 4.5.4.3) perquè es calcula la velocitat de propagació als nodes (i no als punts intermedis).

Tot i la difusió numèrica que comporta, la qual redueix la qualitat dels resultats, l'experiència de més de 15 anys utilitzant l'esquema de primer ordre ha suggerit als experts que la discretització dels termes de propagació en l'espai no són

factors crucials en les simulacions, ja que no tenen un impacte rellevant en els paràmetres de l'onatge (Rogers et al., 2002; WISE Group, 2007).

4.5.4.2. Discretització espectral

L'ús d'esquemes *upwind* de primer ordre genera molta difusió per freqüències properes a la de bloqueig (l'onatge pot ser bloquejat per les corrents per a freqüències relativament altes). Si s'utilitzen esquemes de diferències centrades (per la precisió de segon ordre), llavors es produeixen oscil·lacions sense significat físic causades pels alts gradients de la densitat d'acció (N) a prop de la freqüència de bloqueig. Per tant, s'utilitzen esquemes híbrids centrat-*upwind*.

4.5.4.3. Mètode del *Sweep*

En absència de corrents, la direcció de propagació de la cresta de l'onatge és la mateixa que la de l'energia de l'onatge. Aleshores, la velocitat de propagació de l'energia (c_x, c_y) és igual a la velocitat de grup (c_{gx}, c_{gy}). No és el cas quan existeix presència de corrents. No obstant, per facilitar l'explicació es suposarà el primer dels casos.

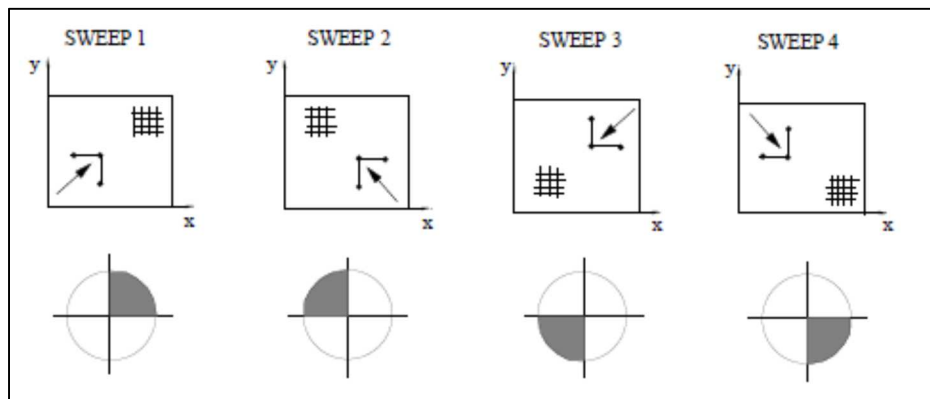


Figura 25: Procediment per resoldre la propagació de l'onatge en l'espai considerant el quadrant de la direcció (àrea ombrejada) apropiat a cada un dels sweeps. [Font: SWAN Scientific and Technical Documentation].

Com que la malla computacional està definida com un rectangle d'elements rectangulars i l'esquema numèric utilitzat (en l'espai i el temps) és un esquema *upwind*, l'estat en un node de càlcul (x_i, y_j) dependrà de l'estat en els nodes immediatament anteriors, en ambdues direccions ((x_{i-1}, y_j) i (x_i, y_{j-1}) en les direccions x i y , respectivament). Per tant, amb aquesta "plantilla" es cobreix la propagació de la densitat de l'acció en un sector de 90° (de 0° a 90° , en aquest

cas, anomenat *sweep* 1), de tot l'espai geogràfic. Girant la "plantilla" 90°, successivament, es va permeten propagar l'onatge en aquell quadrant. Quan s'han realitzat 4 *sweeps*, s'ha permès propagar l'onatge en totes direccions (Figura 25).

Amb aquest mètode la propagació és incondicionalment estable perquè les característiques de l'onatge es mantenen al quadrant corresponent. A més, la propagació no depèn del criteri CFL (Courant-Friedrich-Levy).

4.5.5. Configuració del model SWAN

Aquesta tesina es centra en l'estudi de l'impacte dels camps de vent, en particular dels d'alta resolució, sobre els camps d'onatge. Per tant, s'utilitzarà la configuració física que té el SWAN per defecte, la Generació 3 dels models de generació i propagació d'onatge (GEN3), la qual considera els factors del vent, les interaccions no lineals quàdruples i el *whitecapping*, però no inclou les interaccions no lineals triades, la fricció amb el fons ni el trencament de fons. De la formulació del *whitecapping*, s'utilitza la que té per defecte el SWAN (segons Komen et al., 1984), la qual és la que millors resultats dona a la costa catalana (Pallares, 2016).

Les condicions inicials utilitzades són les que disposa per defecte el model SWAN, ja que a l'intentar simular amb condicions inicials nul·les, el model arribava a la convergència. Aquestes condicions inicials per defecte sorgeixen a partir de l'espectre inicial calculat a partir de les velocitats del vent locals, utilitzant la curva de creixement en aigües profundes de Kahma i Calkoen (1992), tallada per valors de l'altura d'ona significant i de la freqüència de pic segons Pierson i Moskowitz (1964). La forma de l'espectre és la de JONSWAP (Hasselmann et al., 1973) , per defecte, amb un cosinus elevat al quadrat de la distribució direccional.

Pel que fa a l'esquema numèric, com que el principal punt fort del model SWAN, que també és part de l'interès d'aquesta tesina, és la simulació d'onatges generats pel vent en zones costaneres, s'ha decidit utilitzar l'esquema de primer ordre BSBT. Els càlculs realitzats amb el model SWAN en el sistema *Titani* s'han

realitzat seguint una estructura '1-way' pel que fa a la transmissió d'informació entre dominis.

Els procés de generació d'onatge a partir del vent escollit són els que per defecte utilitza SWAN (Cavaleri i Malanotte-Rizzoli, 1981; Komen et al., 1984) segons el coeficient d'arrossegament de Zijlema et al. (2012), respectivament).

Per a realitzar aquest anàlisi s'estableixen diferents configuracions dels dominis (coordenades dels límits dels dominis a la Taula 7) i *inputs* del model SWAN, en base a la resolució d'aquests (Taula 6):

Taula 6: Configuració del model SWAN per a un camp de vents determinat en funció de la resolució del seu domini, els camp de vents i les dades del contorn.

Número de la configuració	Resolució dels dominis model SWAN (km)		
	ESPACIAL	VENTS	CONTORN
1	9	9	-
2	3	9	9
3	3	3	9
4	1	9	9
5	1	3	9
6	1	3	3
7	1	1	9
8	1	1	3

Taula 7: Coordenades dels diferents dominis considerats en el model SWAN.

Domini (resolució)	Longitud inicial/final	Latitud inicial/final
1 (9x9 km)	-4.9/12.5	35.1/44
2 (3x3 km)	-0.143/5.142	39.334/43.479
3 (1x1 km)	0.7/3.3	40.55/42.2

4.6. Eines de validació

La manera més comú de validar els resultats de models que simulen els fenòmens naturals és contrastant aquests en front dades mesurades de les mateixes variables. Aquestes dades, però, han de ser representatives del fenomen que es vulgui estudiar, sinó la validació no tindrà sentit. Per a aquest fi

s'utilitzen tant eines qualitatives, que permetin una comparació ràpida i visual, i eines quantitatives, que donen comparacions més exactes i en format numèric.

Per a la validació dels dos models s'utilitzaran (tant per als resultats del model meteorològic com del model d'onatge) els Diagrames de Taylor, com a eina més aviat qualitativa, i un paràmetre estadístic addicional, el **Pbias**.

4.6.1. Pbias

El **Pbias** permet analitzar la desviació real de les mesures, en percentatge, és a dir, quant sobrepredeix o subpredeix la simulació en front de la mesura. La seva expressió és la següent:

$$Pbias = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - D_i)}{\sum_{i=1}^N D_i} \quad (20)$$

on M_i representa la simulació en l'instant i , D_i representa la mesura en l'instant i , N és el número d'instants de temps del que es tenen dades. El valor òptim del “**Pbias**” és 0, és a dir, no hi ha desviació; per a valors positius voldrà dir que el model està sobrepredint els valors de la variable; i per a valors negatius el model estarà donant valors infraestimats respecte les mesures.

4.6.2. Diagrama de Taylor

La majoria de fenòmens naturals no depenen exclusivament d'una variable, sinó de vàries, inclús poden arribar a dependre de paràmetres (empírics o no) que intervinguin en les equacions que governen el fenomen. És per això que es necessiten mètodes d'anàlisi de resultats que agrupin informació i, en alguns casos, l'adimensionalitzin per a poder comparar tots els factors que intervenen en els processos físics i de càlcul.

Una de les eines més utilitzades per a fer una representació visual de la comparació entre simulacions (f) i mesures (r) és el Diagrama de Taylor (Taylor, 2001). Aquesta informació, simulacions i mesures, ha d'estar en forma discreta (N punts, ja sigui en l'espai o en el temps). El Diagrama permet representar 4 paràmetres estadístics a partir d'un punt en un espai 2D. Aquests paràmetres són:

- Coeficient de Correlació (R):

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (21)$$

on \bar{f} i \bar{r} són les valors mitjans i σ_f i σ_r les desviacions estàndards de f i r , respectivament.

- Desviació estàndard de les f i r (discretes):

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \quad (30)$$

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2} \quad (22)$$

- Error quadràtic mig centrat (E') respecte el valor mitjà entre f i r (discretes):

$$E' = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2} \quad (23)$$

el qual, elevat al quadrats és la diferència entre els quadrats de l'error quadràtic total (E) i l'error mitjà (\bar{E}) (equació 33):

$$E'^2 = E^2 - \bar{E}^2 \quad (24)$$

Aquests quatre paràmetres es poden relacionar segons el Teorema del cosinus, seguint la representació de la Figura 26 per a poder construir el Diagrama:

$$E'^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f \sigma_r R \quad (25)$$

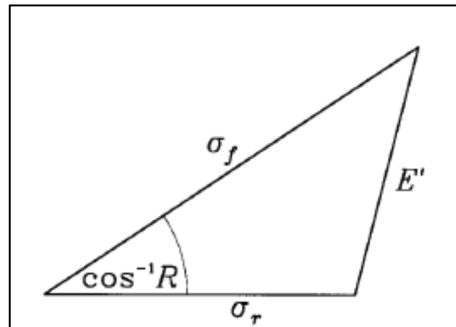


Figura 26: Relació Geomètrica entre el coeficient de correlació (R), l'error quadràtic mig centrat (E') i les desviacions estàndards σ_f i σ_r de les simulacions i les mesures, respectivament. [Font: Taylor, 2001].

A la Figura 27 es mostra un exemple del Diagrama de Taylor al comparar simulacions (*test* marcat amb la creu) i mesures (*reference* marcat amb un cercle).

Per a conèixer sobre d'altres aplicacions més avançades d'aquests Diagrames (p.e. considerar pesos dels diferents N elements) consultar el document original (Taylor, 2001).

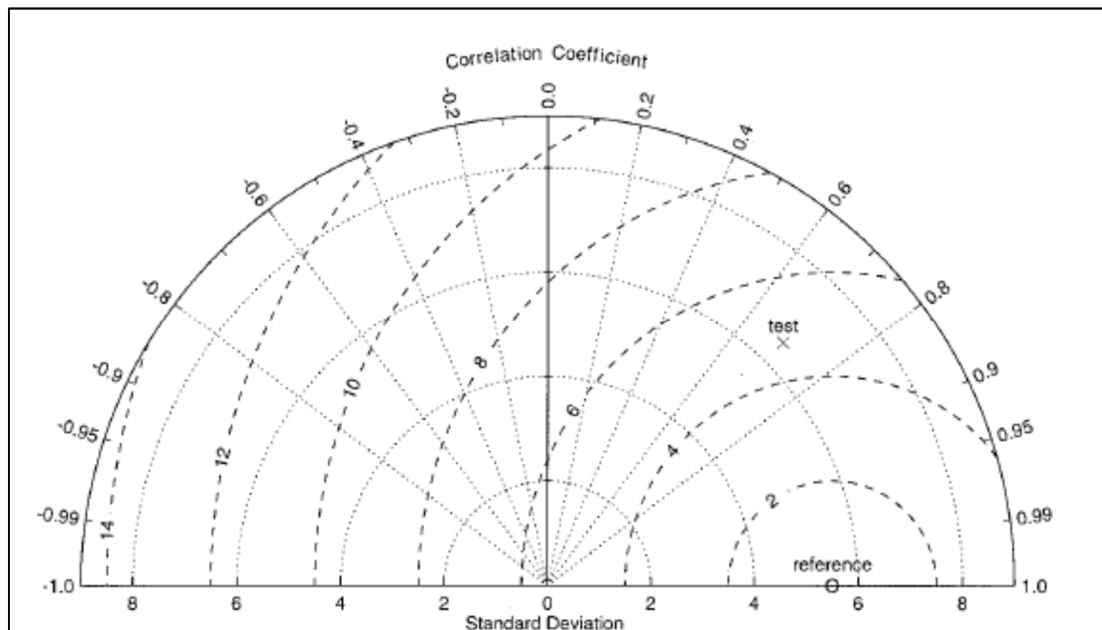


Figura 27: Diagrama per a representar patrons estadístics. La distància radial des de l'origen és proporcional a σ . El RMS centrat entre simulacions i mesures és proporcional a la distància entre els corresponents punts en el Diagrama. R es representa en la direcció angular. [Font: Taylor, 2001].

4.7. Entorns de treball

En aquest apartat es presenten breument l'entorn i els recursos disponibles en els diferents sistemes utilitzats per realitzar els processos de càlcul dels models meteorològic (en el sistema *Mare Nostrum* III) i d'onatge (en el sistema Titani).

Ambdós sistemes s'han fet servir per a realitzar les simulacions a partir de càlculs en paral·lel entre diferents processadors. Per a realitzar aquests càlculs en paral·lel, els dos sistemes requereixen l'ús d'un *shell script*, el qual contindrà les ordres que haurà de seguir el sistema per a executar les tasques. Aquest *script* s'envia al sistema per a enviar les tasques a cues per a ser processades en el moment òptim del sistema, controlat per algoritmes.

4.7.1. Supercomputador MareNostrum III

En aquest apartat es presenten les característiques principals del sistema *MareNostrum* III (Figura 28), en el qual s'han realitzat les simulacions del model meteorològic. *Mare Nostrum* III és un superordinador, gestionat pel *Barcelona Supercomputig Center – Centro Nacional de Supercomputación* (BSC-CNS), destinat, entre d'altres activitats, a realitzar càlculs amb alts costos temporals, computacionals i de memòria.

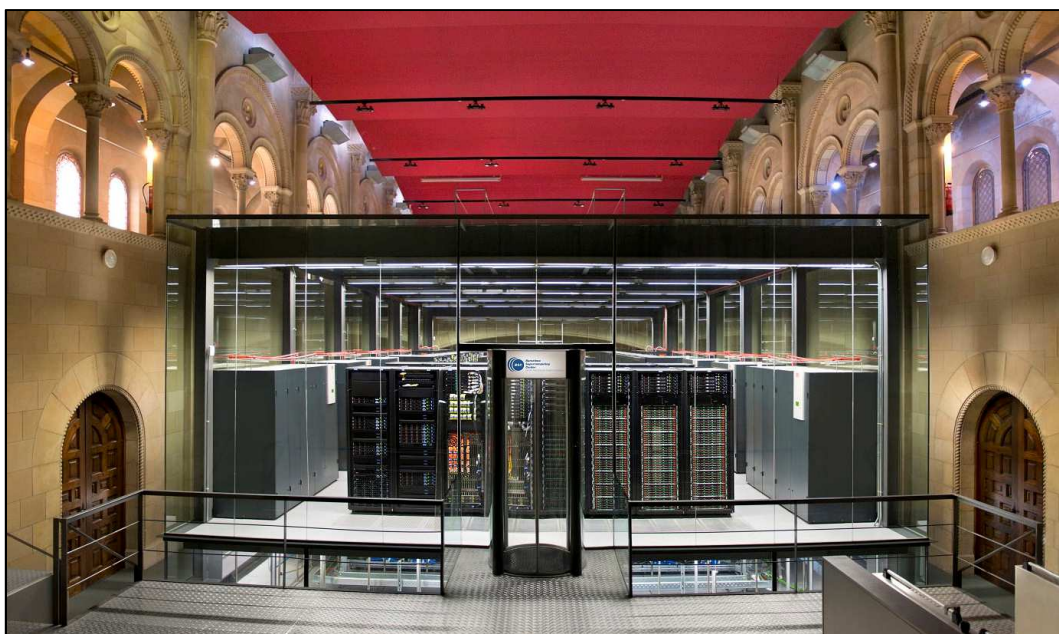


Figura 28: Imatge del sistema MareNostrum III l'any 2012. [Font: BSC-CNS]

A continuació es presenta un resum esquemàtic dels principals components del sistema:

- **37 estants de computació iDataPlex**, compost cada un per:
 - 84 IBM dx360 M4 nodes de càlcul
 - ◆ 2x E5-2670 SandyBridge-EP 2.6GHz cache 20 MB 8-core
 - ◆ 500 GB 7200 rpm SATA II local HDD
 - 4 Unitats de distribució d'energia.
- Els **nodes** es diferencien per:
 - **RAM:**
 - ◆ **128 nodes** contenen 8x 16G DDR3-1600 DIMMs (8 GB/nucli) **Total: 128 GB/node**
 - ◆ **128 nodes** contenen 16x 4G DDR3-1600 DIMMs (4 GB/nucli) **Total: 64 GB/node**

- ♦ **2880 nodes** contenen 8x 4G DDR3-1600 DIMMs (2GB/nucli) **Total: 32 GB/node**
- **42 nodes heterogenis** contenen:
 - ♦ 8x 8G DDR3-1600 DIMMs (4 GB/nucli) **Total: 64 GB/node**
 - ♦ 2x acceleradors Xeon Phi 5110P
- **Sistema Operatiu:** Linux – SuSe Distribution 11 SP3
- **Gestor de tasques:** sistema LSF

El sistema permet realitzar càlculs en sèrie (*sequential*) o en paral·lel. Dins de la computació en paral·lel es pot triar entre:

- *Distributed Memory Parallelism* (MPI): cada node de càlcul disposa d'una memòria que només ell utilitza.
- *Shared Memory Parallelism* (OpenMP): a diferència del MPI, aquí els nodes comparteixen memòria i es comuniquen entre ells.

Cada usuari té la seva pròpia carpeta, on disposa les dades, eines i programes que necessita. Des d'aquesta carpeta es poden enviar tasques a cues (especificant temps i nodes necessaris) per a ser executades en el moment òptim. El sistema *Mare Nostrum III* permet enllaçar diferents tasques (executar tasques en ordre) utilitzant un mateix *shell script*.

Per a més informació consultar el *User's Guide* de *MareNostrum III* (2015).

De mitjana els recursos consumits en les simulacions meteorològiques (1 dia simulat), per a 32 nodes de càlcul i l'ús del programa MPI (*shared and distributed memory*), són:

- Temps de càlcul per node = 2h i 47 min
- Energia = 1.51 kWh
- Memòria total = 57984 Mb

4.7.2. Sistema Titani

Titani és el sistema d'alt rendiment de l'Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona (gestionat per CaminsTECH) format per un conjunt de servidors Dell. Aquest sistema és un entorn multitasques i multiusuari (semblant al *Mare Nostrum III*, però de bastanta menor capacitat) configurat amb un Sistema Operatiu **CentOS 7 Linux** i amb un gestor de tasques que utilitza el **SLURM open-source**. Les simulacions del model d'onatge s'han realitzat en aquest sistema.

El sistema està dividit en dues parts:

- Servidor d'interfície o accés: des d'on treballa cada usuari.

- Servidors/nodes de computació: on es realitzen els càlculs que l'usuari envia des del servidor d'interfície.

Aquest sistema permet apagar aquell node de càlcul que hagi estat 30 minuts inactiu. D'aquesta manera es permet un ús més eficient i sostenible dels recursos.

El sistema té disponibles fins a 5 nodes de càlcul Dell PowerEdge R630, els quals tenen les següents propietats:

- **CPU:** 2x Intel Xeon ES2650L v3 de 1.8 GHz
- **Nuclis:** 12 nuclis per processador
- **Caché:** 30 MB
- **RAM:** 256 GB
- **Disc Local:** 2x 250 GB SATA

De la mateixa manera que en el *Mare Nostrum III*, al sistema Titani es poden realitzar càlculs en sèrie o en paral·lel (MPI i OpenMP). No obstant, el sistema Titani no permet enllaçar diferents tasques, enviades a partir del mateix

Per a més informació consultar *TITANI CLUSTER USER MANUAL V.1.2* (2016).

A la Taula 8: Recursos de temps i memòria consumits per node en les simulacions de l'onatge (simulant tota la tempesta), per a 10 nodes de càlcul. es presenten els recursos consumits, de mitjana, per a les simulacions de l'onatge (la tempesta sencera), per a 10 nodes de càlcul i utilitzant el programa OpenMP (*only shared memory*).

Taula 8: Recursos de temps i memòria consumits per node en les simulacions de l'onatge (simulant tota la tempesta), per a 10 nodes de càlcul.

CONFIGURACIÓ	1	2	3	4	5	6	7	8
TEMPS DE CÀLCUL PER NODE (MIN)	11.95	21.94	24.98	26.02	25.92	25.20	24.53	24.58
MEMÒRIA MÀXIMA SOL·LICITADA PER NODE (MB)	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000	8000

5. Resultats

En aquest apartat es presentaran els resultats de cada un dels models, tant d'una manera general per a cada un dels dominis considerats, com d'una forma més localitzada en alguna de les estacions de mesura. Donat que aquest és un treball extens i amb diverses estacions de mesura, s'ha considerat exposar els resultats únicament de dues localitzacions, el Pont del Petroli i la Boia Exterior de Tarragona, les quals disposen de dades meteorològiques i d'onatge. D'aquesta manera es podrà analitzar el comportament del model en dues situacions diferents, a zones d'aigües transitòries o poc profundes (Pont del Petroli) i a aigües profundes (Boia de Tarragona).

Els resultats de la resta d'estacions s'adjunten en l'Annex 1 (per a les dades meteorològiques) i en l'Annex 2 (per a les dades d'onatge).

5.1. Resultats del model meteorològic

Per a realitzar l'anàlisi dels resultats meteorològics es disposa de les següents dades:

- Mesures en diferents localitzacions de la costa catalana.
- Resultats model WRF per a diferents dominis: 27x27 km; 9x9 km; 3x3 km; 1x1 km.
- Resultats provinents d'AEMET en diferents dominis: 16x16 km i 5x5 km.

En aquest estudi s'utilitzarà el model AEMET com a model de referència i, per tant, també es compararà amb les mesures i amb els resultats provinents del present treball.

Com a eines de comparació qualitatives s'utilitzaran les roses dels vents i les sèries temporals. Així doncs, permetran fer una comparació ràpida i visual de les simulacions enfront les mesures.

Pel que fa a la comparació qualitativa, els indicadors que s'utilitzaran per determinar la exactitud, precisió i bonança dels camps de vent (mòdul i direcció) són els utilitzats en els Diagrames de Taylor i el Pbias, exposats en anteriors apartats.

Per facilitar a l'hora de comparar les configuracions s'ha decidit realitzar l'anàlisi de totes elles, corresponents al domini de 3x3 km. Tot seguit es presentarà l'evolució del model amb la millora de la resolució per la configuració que en resulti òptima de l'anterior anàlisi.

5.1.1. Pont del Petroli

Es pot observar (Figura 31 i Figura 32) com en tots els casos les velocitats màximes de la tempesta (principalment de direcció NE) són bastant ben captades pel model, sobretot per la configuració "ERA & YSU", la qual representa les seccions molt ben centrades en la direcció que ho fan les mesures i amb velocitats ben associades a aquestes direccions. També s'observa prou bé la segona direcció principal (vents de NO). No obstant, al model li costa capturar la tercera direcció principal (SO), probablement per la dificultat de precisar la direcció per a velocitats baixes, les quals tenen menys energia.

A la Figura 29 es pot observar com les configuracions MYJ tendeixen a sobrepredir les velocitats, mentre que les configuracions que utilitzen la formulació de la Yosuei University, tendeixen a quedar-se amb valors per sota dels mesurats a l'estació en els períodes de major intensitat del vent, mentre que sobreestimen els períodes de calma. També es pot observar com en totes les configuracions i models, la direcció s'ajusta molt bé quan aquesta és intensa, però es desvia molt fàcilment quan les velocitats són petites.

A la Figura 30 es veu com les direccions semblen estar millor simulades amb la PBL del Mellor-Yamada-Janjic, però la velocitat està més ben representada per les configuracions que utilitzen la formulació de la PBL de la Yosuei University. Pel que fa a les direccions, les configuracions que utilitzen la formulació de la PBL de Mellor-Yamada-Janjic són les que millor s'ajusten a les mesures, amb diferència.

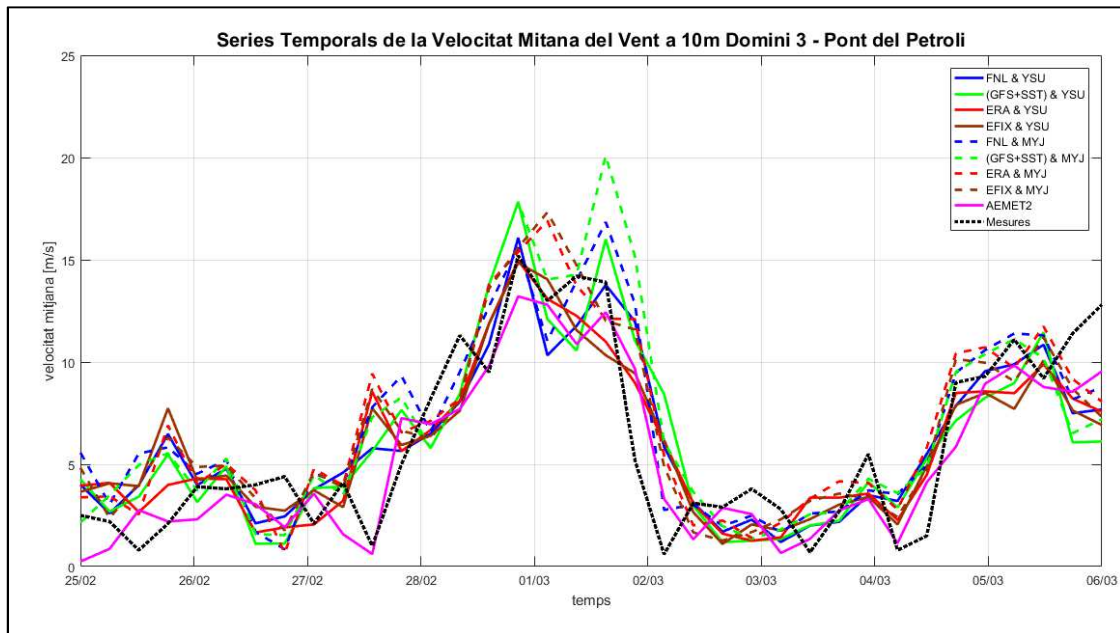


Figura 29: Sèries Temporals de la velocitat mitjana del vent a 10m d'altura al Pont del Petroli segons mesures locals, model AMET (5x5 km de resolució) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).

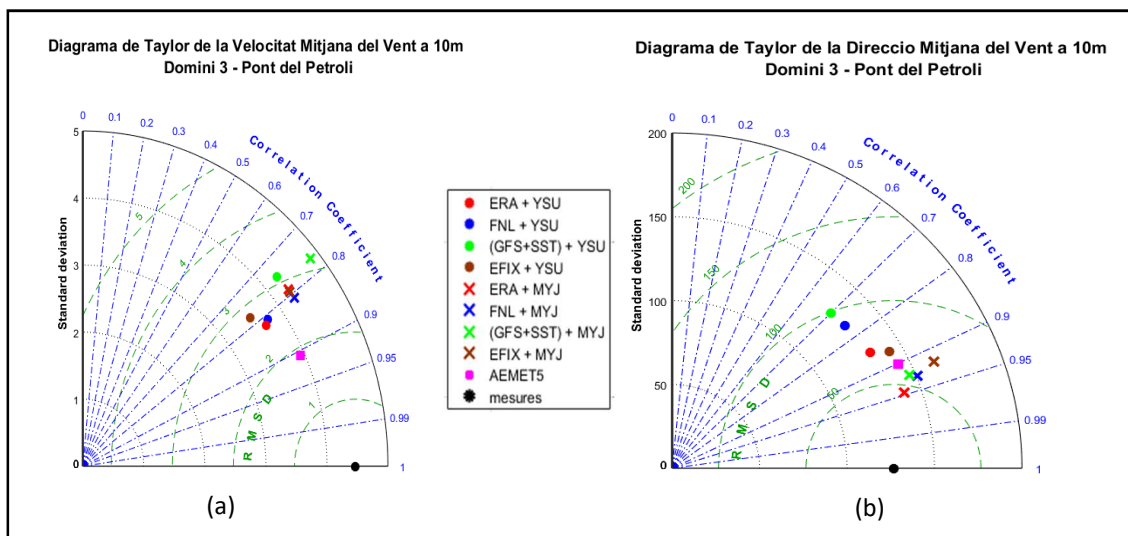


Figura 30: Diagrames de Taylor de la velocitat (a) i direcció (b) mitjanes del vent a 10m al Pont del Petroli segons mesures, dades d'AEMET (5 km de resolució) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3 km de resolució).

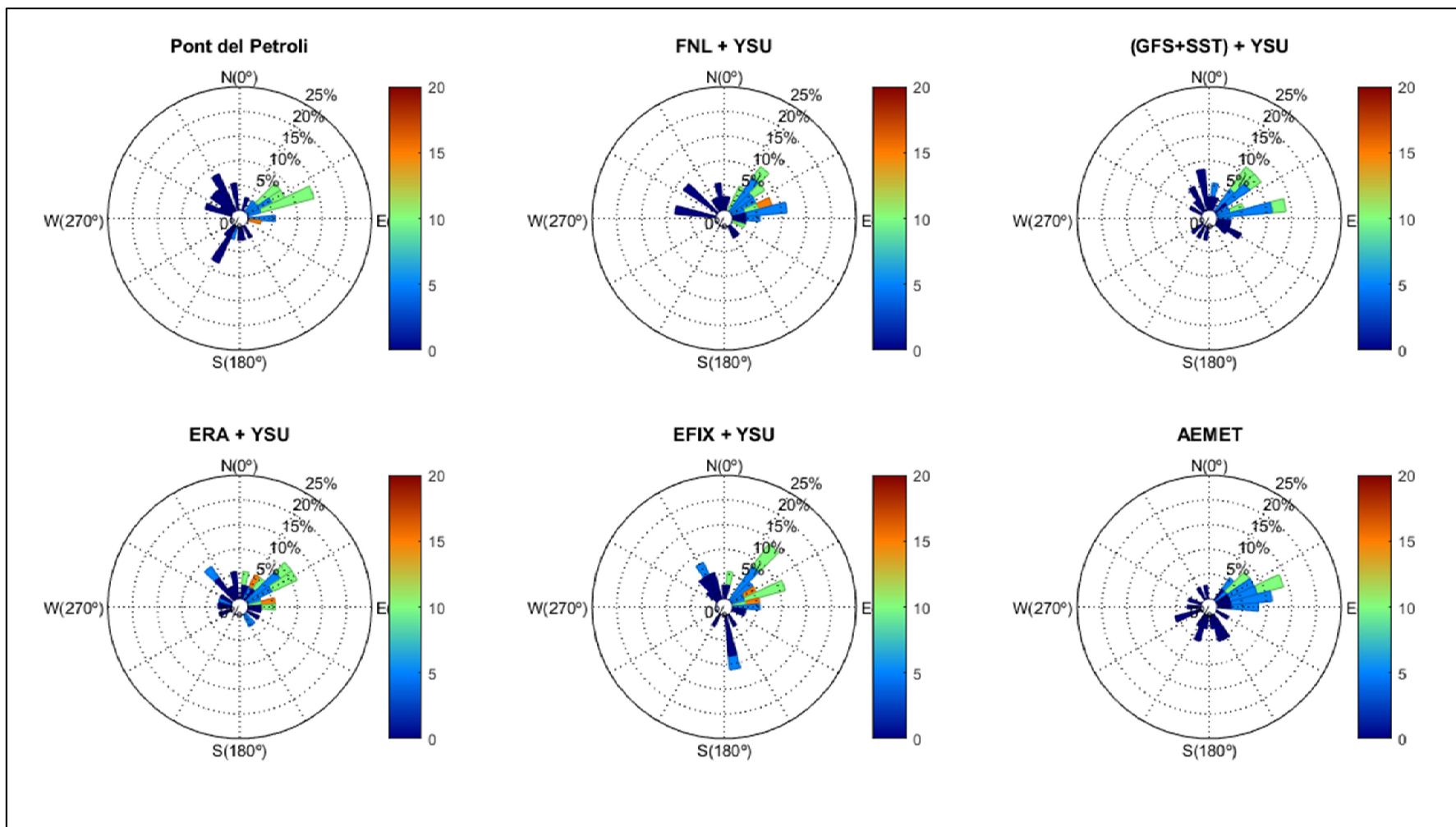


Figura 31: Roses dels vents de les mesures (Pont del Petrolí), dades d'AEMET (5x5 km de resolució), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació YSU de la PBL.

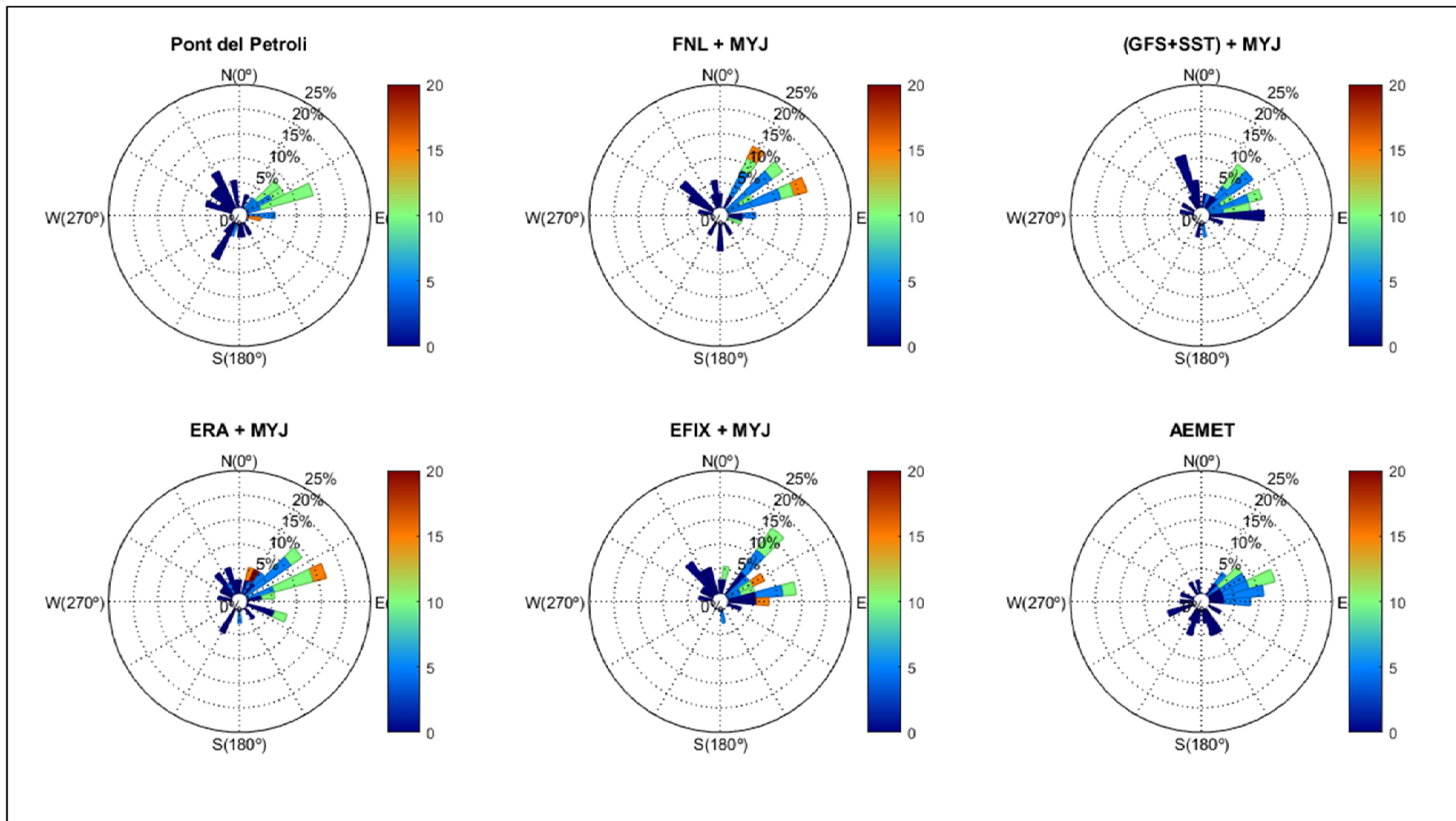


Figura 32: Roses dels vents de les mesures (Pont del Petrolí), dades d'AEMET (5x5 km de resolució), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació MYJ de la PBL.

Taula 9: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) i de dades d'AEMET (resolució 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m en el Pont del Petroli.

<i>Pont del Petroli</i>	<i>Pbias Velocitat (%)</i>	<i>Coef. Correlació Velocitat</i>	<i>Pbias Direcció (%)</i>	<i>Coef. Correlació Direcció</i>
<i>FNL & YSU</i>	4.39	0.81	-7.51	0.76
<i>(GFS+SST) & YSU</i>	4.01	0.75	-6.70	0.70
<i>ERA & YSU</i>	0.67	0.82	-4.56	0.85
<i>EFIX & YSU</i>	2.19	0.78	-6.52	0.87
<i>FNL & MYJ</i>	13.24	0.81	-5.55	0.93
<i>(GFS+SST) & MYJ</i>	14.21	0.77	-0.06	0.93
<i>ERA & MYJ</i>	13.55	0.79	-5.15	0.95
<i>EFIX & MYJ</i>	11.38	0.79	-1.53	0.92
<i>AEMET 5km</i>	-13.48	0.91	-1.83	0.90

A la Taula 9 s'observa com els valors del Pbias per a la velocitat són mínims per a la configuració "ERA & YSU" (sense tenir en compte el model AEMET), és a dir, que aquesta configuració s'ajusta millor i està menys esbiaixada que la resta. Si s'observa el coeficient de correlació, aquests és el màxim del de totes les configuracions del model WRF.

5.1.2. Boia de Tarragona (REDEXT)

En aquesta localització a mar obert, les configuracions que utilitzen la formulació de la PBL de la Yousei University generen resultats relativament menys dispersos que els de la formulació Mellor-Yamada-Janjic (Figura 34). En particular, es capten els vents més dèbils provinents del SO. El model AEMET genera pitjors resultats que en el cas més proper a la costa. No obstant, les direccions simulades (Figura 35 i Figura 36) concorden amb les direccions esperables en el front marítim tarragoní: vents de llevant i gregal o vents de mestral (provinents de la vall de l'Ebre).

De totes les configuracions del model WRF, la que sembla "concentrar" més els resultats en les direccions principals, és a dir, té menys variabilitat, és la configuració "EFIX & YSU".

Les velocitats simulades es situen lleugerament per sobre de les mesurades a la boia un cop ha passat el pic de la tempesta, tal i com es pot observar a la Figura 33, però capten prou bé les variacions mesurades a la boia.

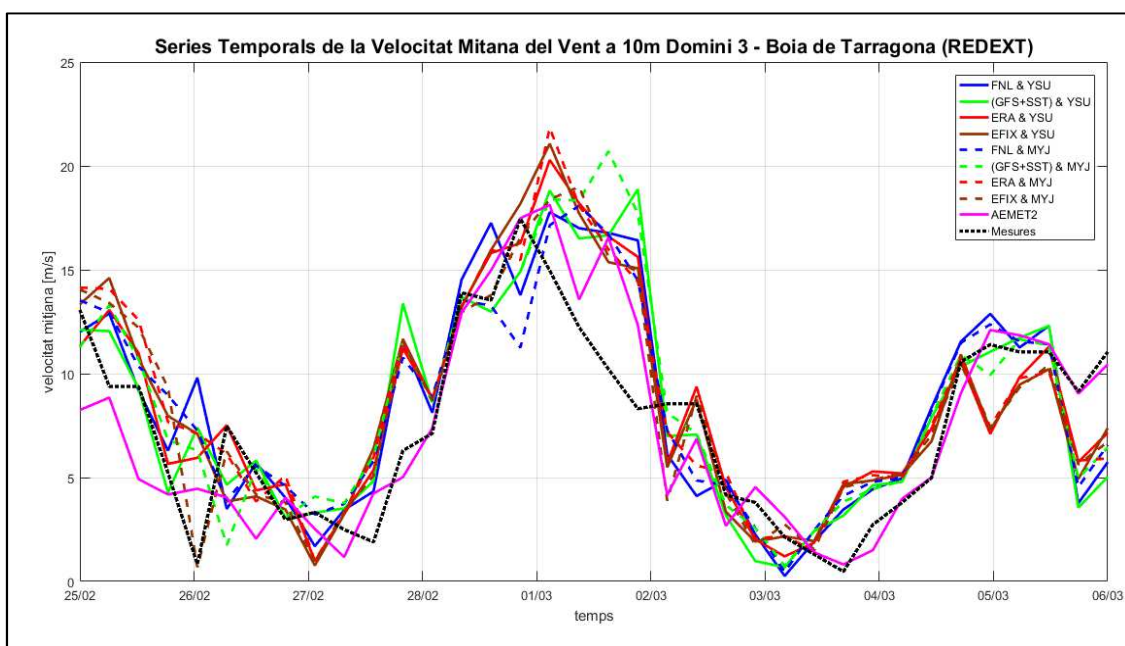


Figura 33: Sèries Temporals de la velocitat mitjana del vent a 10m d'altura la boia exterior de Tarragona segons mesures locals, dades d'AMET (resolució de 5x5 km) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).

Tot i captar aproximadament les direccions predominants de la zona, quantitativament es pot observar com els resultats estan més allunyats que en el cas del Pont del Petroli.

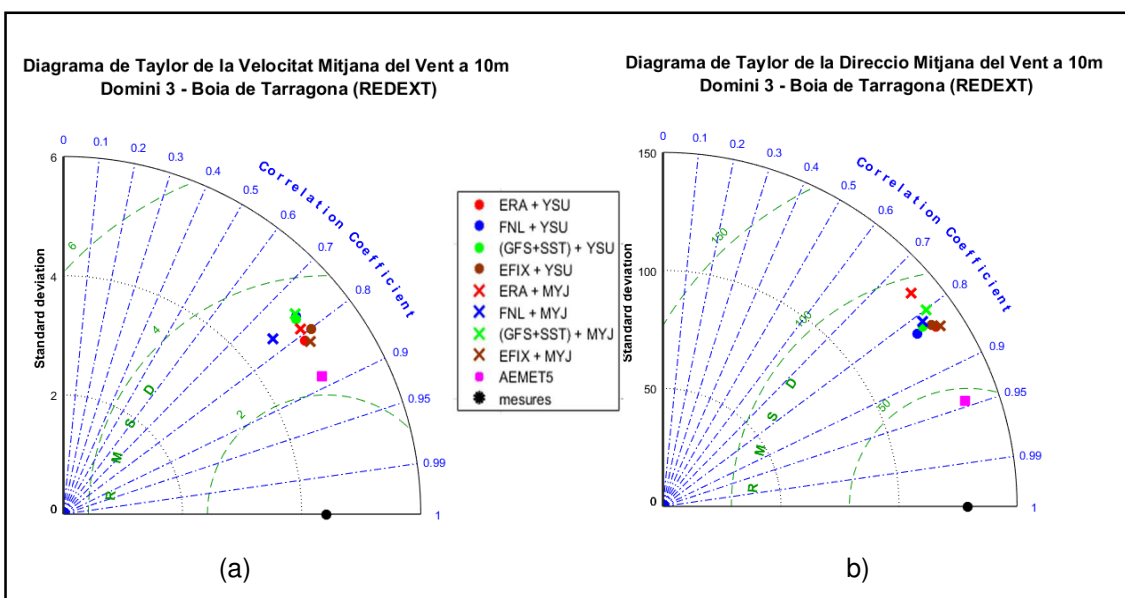


Figura 34: Diagrames de Taylor de la velocitat (a) i direcció (b) mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona segons mesures, dades d'AEMET (resolució de 5x5 km) i diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució).

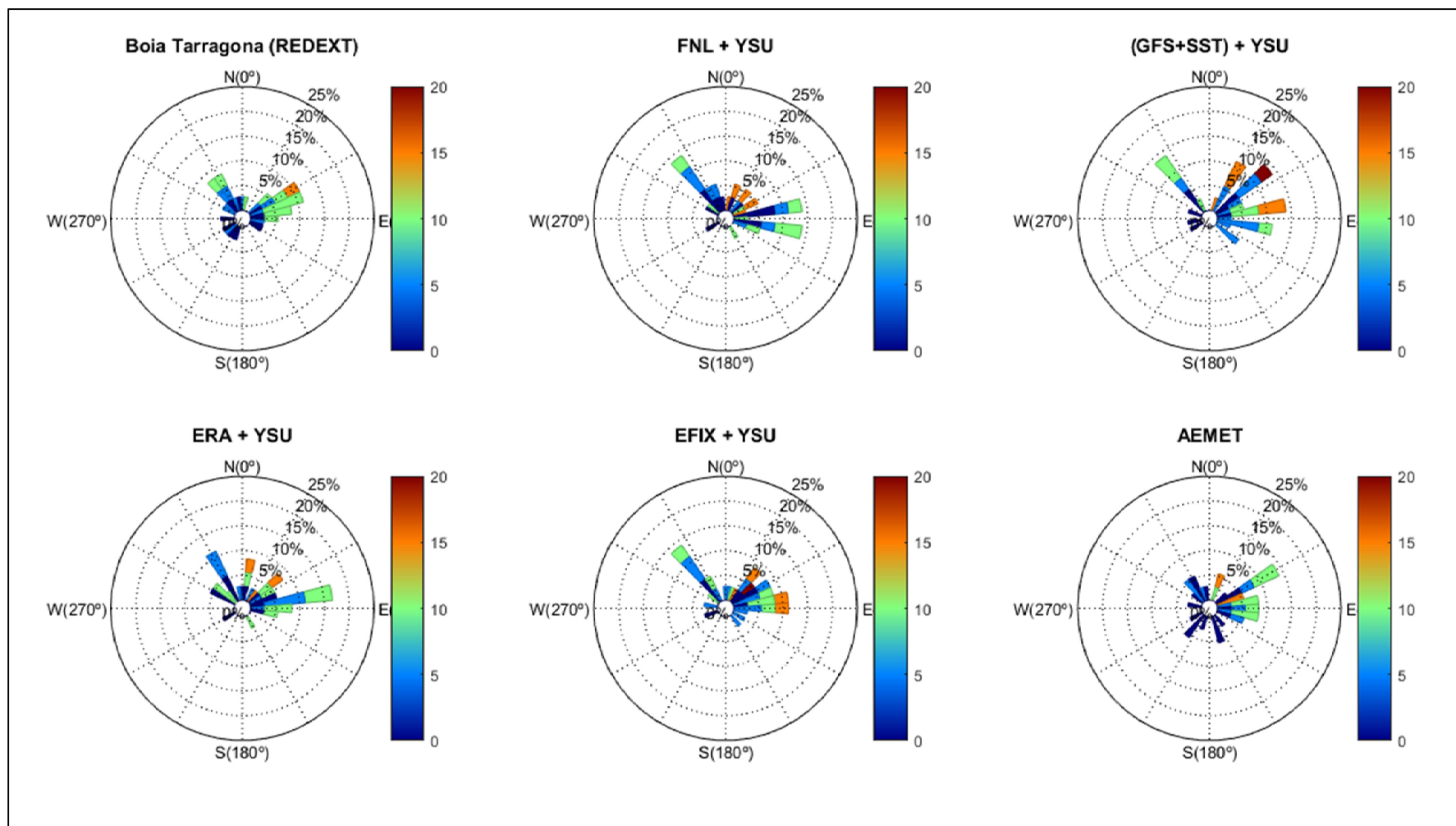


Figura 35: Roses dels vents de les mesures (boia exterior de Tarragona), de dades d'AEMET (resolució de 5x5 km), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació YSU de la PBL.

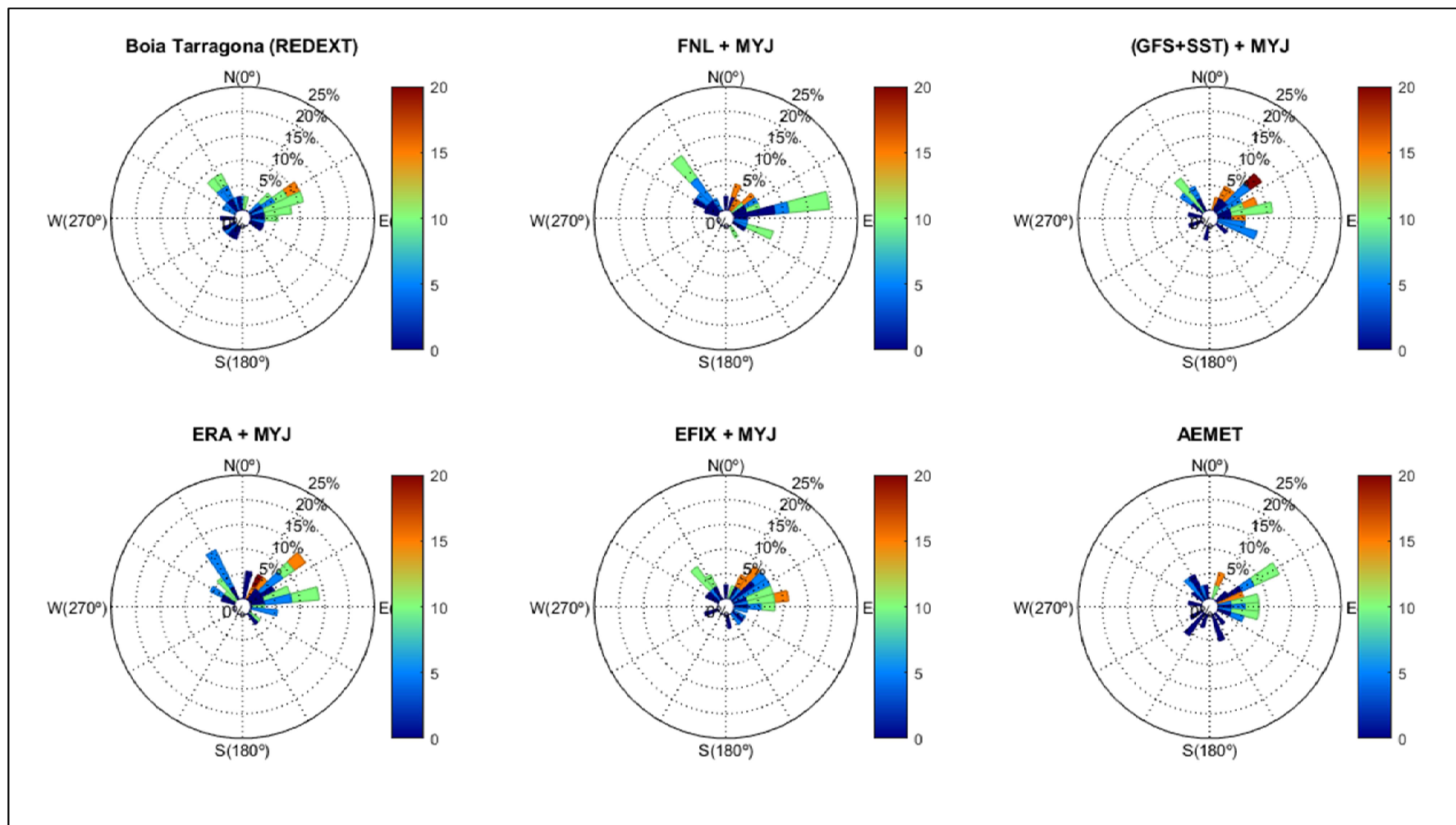


Figura 36: Roses dels vents de les mesures (boia exterior de Tarragona), dades d'AEMET (resolució de 5x5 km), i diferents inputs de vent del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) utilitzant la formulació MYJ de la PBL.

A la Taula 10 es presenten els paràmetres estadístics considerats en la comparació de les simulacions i les mesures a la Boia de Tarragona (REDEXT):

Taula 10: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents configuracions del model WRF (domini de 3x3 km de resolució) i de les dades d'AEMET (resolució de 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona.

<i>Boia exterior de Tarragona</i>	<i>Pbias Velocitat (%)</i>	<i>Coef. Correlació Velocitat</i>	<i>Pbias Direcció (%)</i>	<i>Coef. Correlació Direcció</i>
<i>FNL & YSU</i>	11.26	0.76	8.57	0.83
<i>(GFS+SST) & YSU</i>	10.15	0.77	9.79	0.82
<i>ERA & YSU</i>	12.31	0.81	11.41	0.84
<i>EFIX & YSU</i>	12.26	0.80	8.92	0.83
<i>FNL & MYJ</i>	11.84	0.77	7.72	0.81
<i>(GFS+SST) & MYJ</i>	12.97	0.76	9.93	0.80
<i>ERA & MYJ</i>	13.48	0.79	8.56	0.76
<i>EFIX & MYJ</i>	9.82	0.82	8.99	0.84
<i>AEMET 5km</i>	-1.89	0.88	8.08	0.94

Els millors paràmetres estadístics els dona la configuració EFIX & MYJ que la situen més a prop (obviant el model AEMET) de les mesures, seguit de ben a prop per la configuració ERA & YSU.

5.1.3. Configuració òptima del model meteorològic

Analitzant les dues localitzacions escollides, no hi ha una configuració òptima per als dos casos a l'hora, ni per a les dues variables (mòdul i direcció mitjanes del vent). Per tant, és necessari fer una elecció a partir d'uns criteris.

Primer, donat que la velocitat del vent és el agent que, traduït a energia, genera l'onatge, es prioritzarà aquesta variable enfront la direcció. Segon, com l'interès d'aquest estudi centra més en les zones costaneres, es considerarà més important ajustar millor els resultats a aquestes zones que a mar obert.

Tenint en compte aquestes condicions, la configuració que resultaria òptima, en una situació determinista, seria la configuració **ERA & YSU**. No obstant, en la localització de mar obert aquesta configuració ERA & YSU dona prestacions molt semblants a la de la configuració EFIX & MYJ.

5.1.4. Anidament de la configuració òptima

En aquest apartat es presentarà l'evolució del model meteorològic, utilitzant la configuració òptima obtinguda en l'anterior apartat, al realitzar el mètode dels anidaments. Aquests resultats es mostren respecte l'estació del Pont del Petrolí i la Boia de Tarragona (REDEXT).

A les Figura 38 i Figura 39 es pot observar, de manera qualitativa, l'evolució del model WRF al realitzar l'augment de la resolució del domini espacial al Pont del Petrolí i a la Boia Exterior de Tarragona.

En ambdós casos, el domini més groller genera una variabilitat elevada de resultats (tot i representar alguna direcció principal, es mostren vents en moltes direccions i magnituds). A l'augmentar la resolució, es sembla captar millor la direcció mitjana, sobretot a prop de la costa, i a sobrepredir la velocitat del vent (especialment a mar obert). Els resultats a mar obert tendeixen a ser més variables, en magnitud i direcció mitjanes del vent, que en zones costaneres.

Si s'observen les sèries temporals de la velocitat mitjana del vent a 10 m al Pont del Petrolí (Figura 37) i a la Boia Exterior de Tarragona (Figura 38) es veu com en la primera a cada augment de la resolució del domini s'obtenen valors major mentre que a la segona el domini de 9x9 km de resolució és el que majors valors dóna (sobrepredint tots els dominis en general).

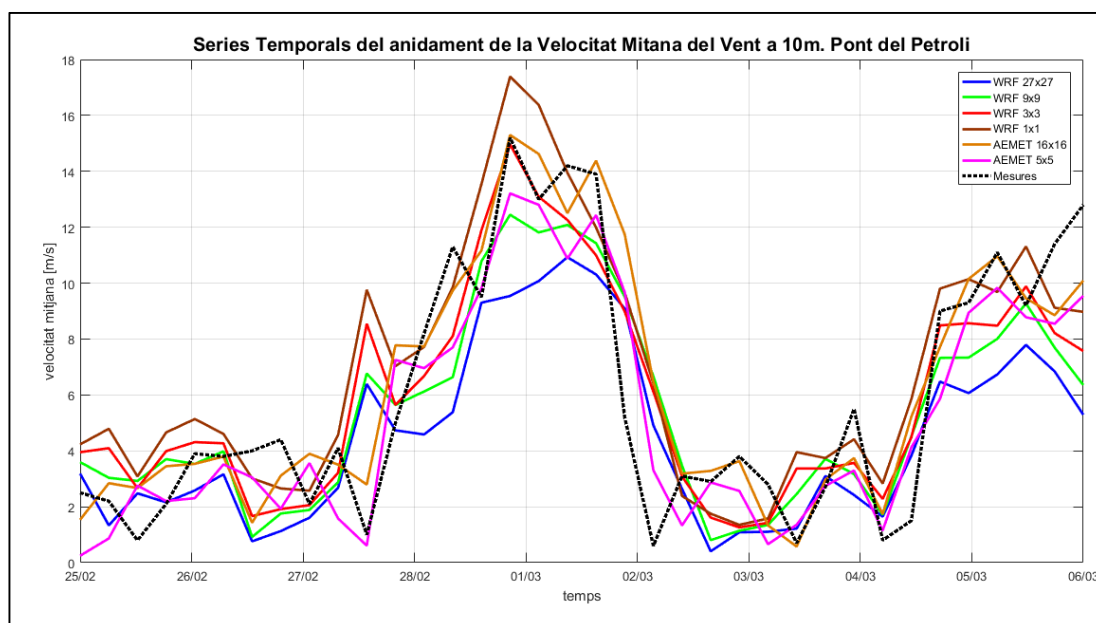


Figura 37: Sèries temporal de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura al Pont del Petrolí de les mesures, dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i dels resultats del model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".

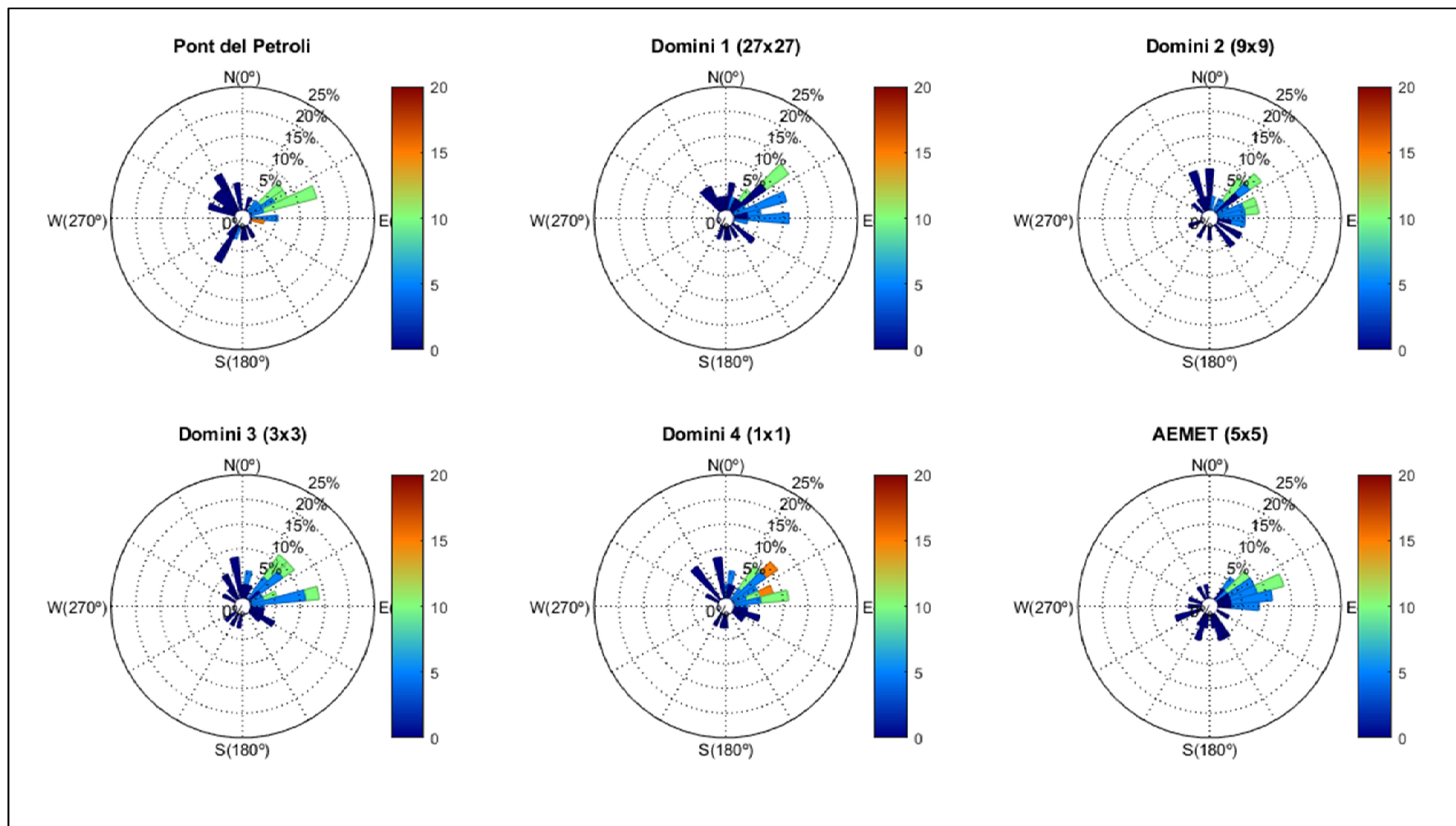


Figura 38: Roses dels vents de les mesures del Pont del Petroli, de dades d'AEMET (5x5 km de resolució) i dels resultats del model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".

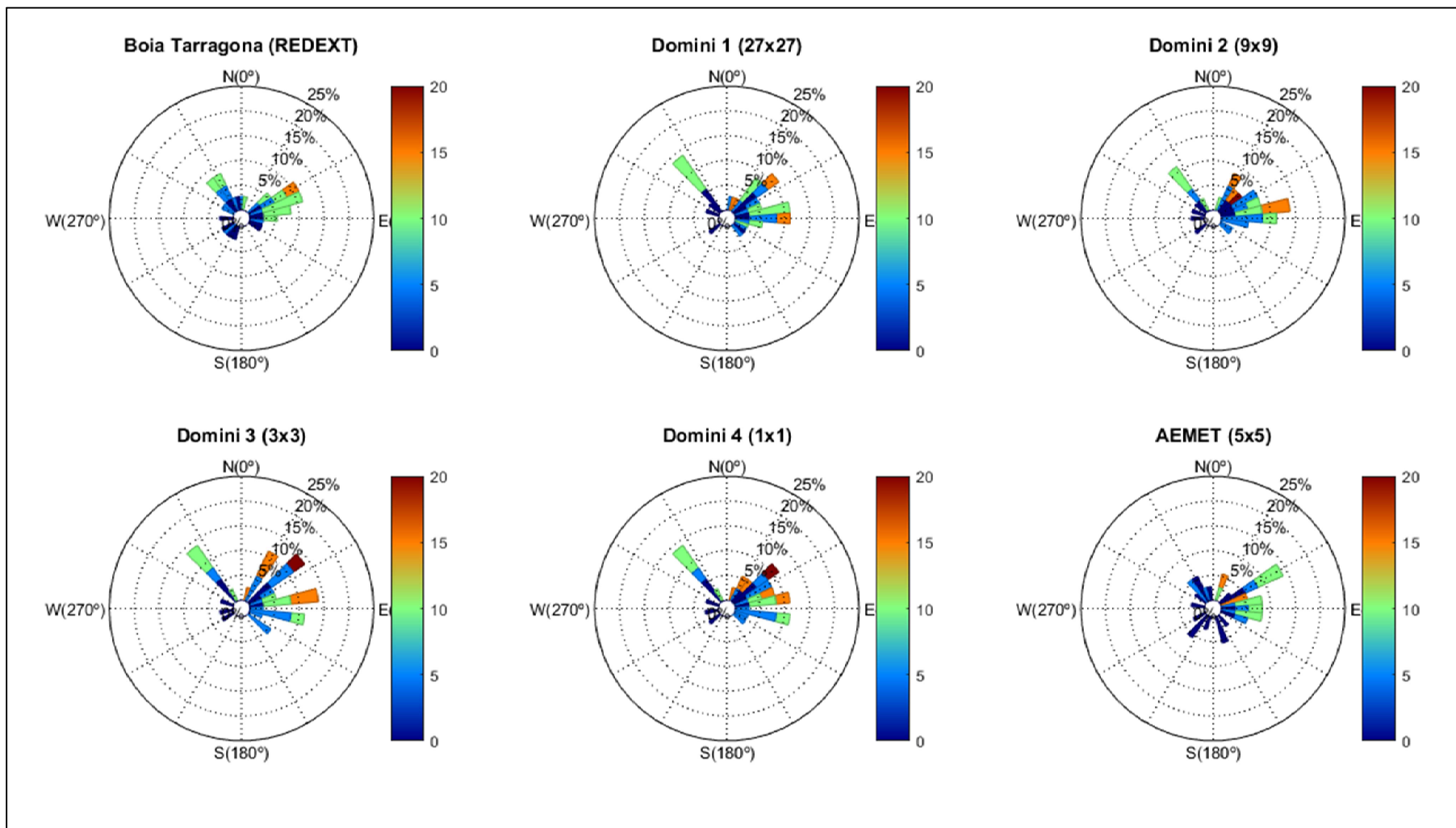


Figura 39: Roses dels vents de les mesures de la Boia de Tarragona (REDEXT), el model AEMET (resolució de 5x5 km) i els dominis utilitzats en el model WRF per al camp de vents "ERA & YSU".

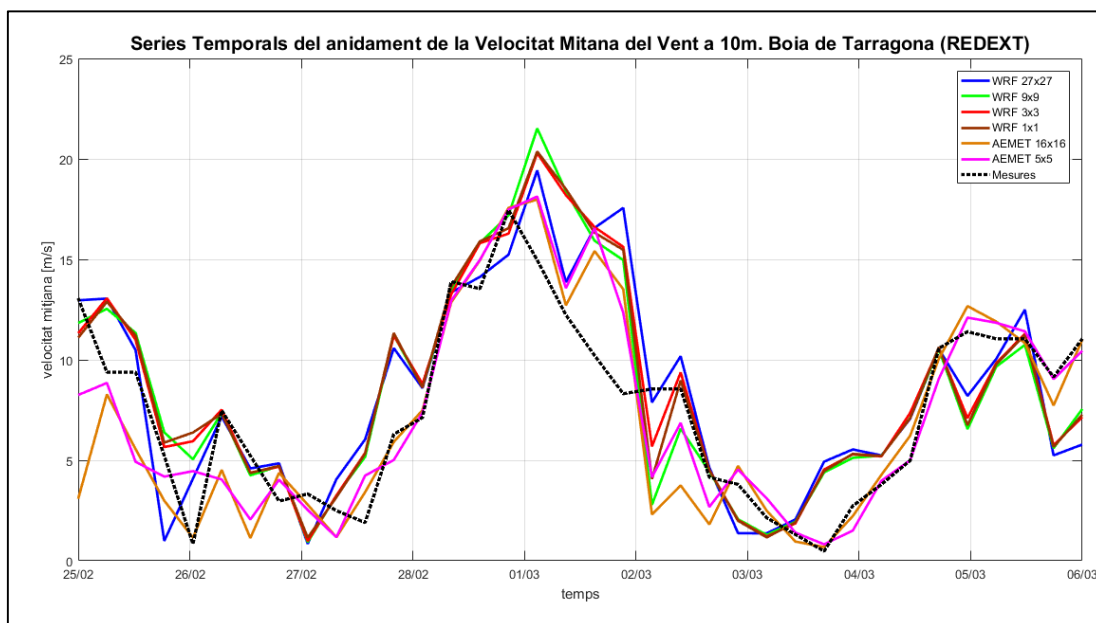


Figura 40: Sèries temporals de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura a la boia exterior de Tarragona de les mesures, de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i el model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".

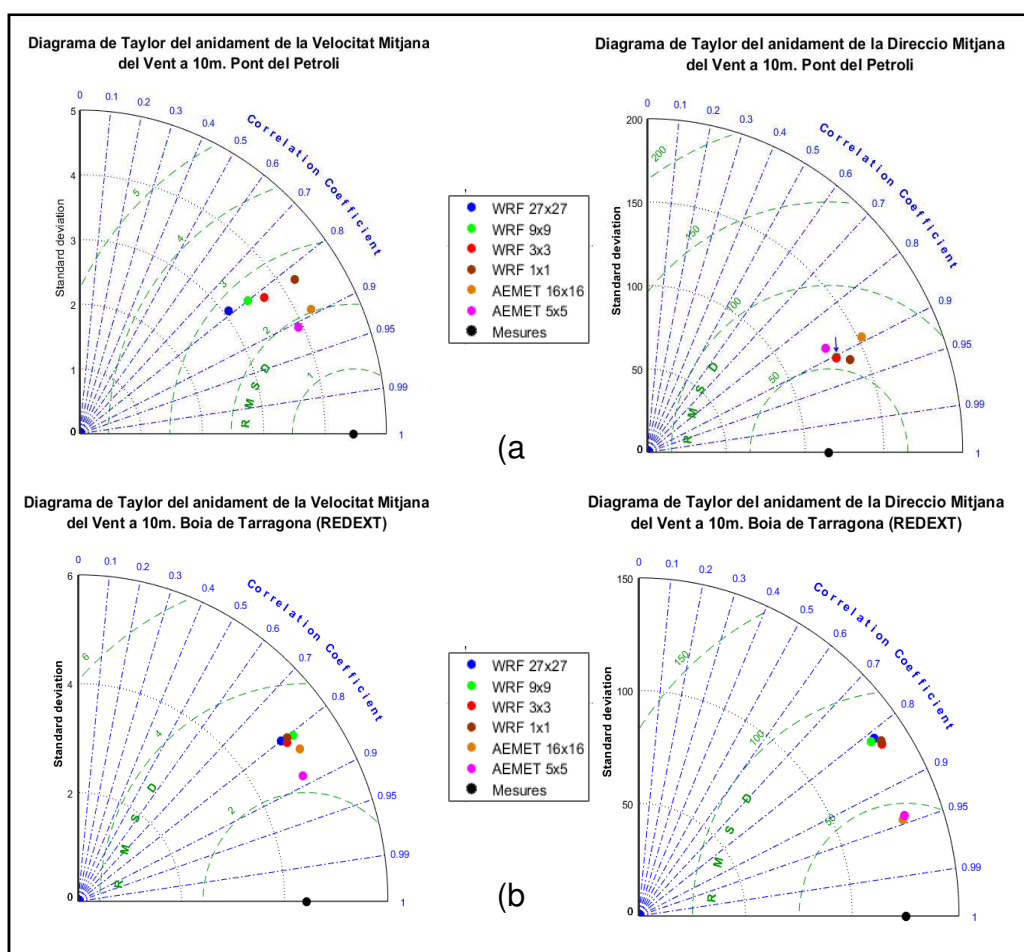


Figura 41 Diagrames de Taylor de la velocitat i direcció mitjanes del vent a 10 m d'altura al Pont del Petroli (a) i a la Boia Exterior de Tarragona (b) de les mesures, el model AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) i el model WRF (resolucions de 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) per al camp de vents "ERA & YSU".

Als Diagrames de Taylor (Figura 41) es pot observar com les correlacions a mar obert o a prop de la costa són semblants, al voltant de 0.8, mentre que a la línia de costa s'obtenen direccions més properes a les mesures.

Taula 11: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents dominis del model WRF (resolucions 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) i de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m al Pont del Petroli per al camp de vents "ERA & YSU".

<i>Pont del Petroli</i>	<i>Pbias Velocitat (%)</i>	<i>Coef. Correlació Velocitat</i>	<i>Pbias Direccio (%)</i>	<i>Coef. Correlació Direcció</i>
<i>Mesures</i>	0.00	1.00	0.00	1.00
<i>WRF 27x27 km</i>	-31.07	0.79	-4.00	0.91
<i>WRF 9x9 km</i>	-8.74	0.80	-2.40	0.90
<i>WRF 3x3 km</i>	0.67	0.82	-4.56	0.90
<i>WRF 1x1 km</i>	14.52	0.83	-0.06	0.92
<i>AEMET 16x16 km</i>	5.85	0.89	7.87	0.89
<i>AEMET 5x5 km</i>	-13.48	0.91	-1.92	0.88

A la Taula 11 es pot observar com el domini de major resolució del WRF, tot i sobrepredir bastant la velocitat (valors del Pbias positius), aquesta s'ajusta millor, i donant els millors resultats de direcció mitjana del vent.

Taula 12: Paràmetres estadístics utilitzats en la comparació de diferents dominis del model WRF (resolucions 27x27, 9x9, 3x3 i 1x1 km) i de dades d'AEMET (resolucions de 16x16 i 5x5 km) per a les velocitat i direcció mitjanes del vent a 10m a la boia exterior de Tarragona per al camp de vents "ERA & YSU".

<i>Boia exterior de Tarragona</i>	<i>Pbias Velocitat (%)</i>	<i>Coef. Correlació Velocitat</i>	<i>Pbias Direccio (%)</i>	<i>Coef. Correlació Direcció</i>
<i>Mesures</i>	0.00	1.00	0.00	1.00
<i>WRF 27x27 km</i>	10.28	0.80	9.84	0.81
<i>WRF 9x9 km</i>	10.41	0.81	6.62	0.81
<i>WRF 3x3 km</i>	12.31	0.81	12.02	0.83
<i>WRF 1x1 km</i>	11.81	0.80	11.74	0.83
<i>AEMET 16x16 km</i>	-7.83	0.84	8.45	0.95
<i>AEMET 5x5 km</i>	-1.89	0.88	8.50	0.94

En canvi, a mar obert (Taula 12) el domini de 3x3 km de resolució és el que millor ajusta, però el que més sobrepredeix. Totes les simulacions amb el model WRF han generat valors, de mitjana, per sobre dels mesurats a la boia, mentre que els resultats d'AEMET són subpredits.

No obstant, tots els paràmetres utilitzats en l'anàlisi de les simulacions no es diferencien excessivament entre els dominis de menor i major resolució, sobretot per a la velocitat mitjana del vent.

En la Figura 42 es mostra els mapes de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura per a la configuració òptima (la que ha utilitzat un vent ERA-Inerim amb una parametrització de la PBL segons *Yonsei University*) i en el domini de càlcul de 3x3 km de resolució. Amb aquests mapes es pot observar com la tempesta analitzada impacta amb forts vents la costa catalana, sobretot la part central, provinents principalment del NE. També hi ha una presència important de vents al Delta de l'Ebre, provinents de la vall del mateix riu.

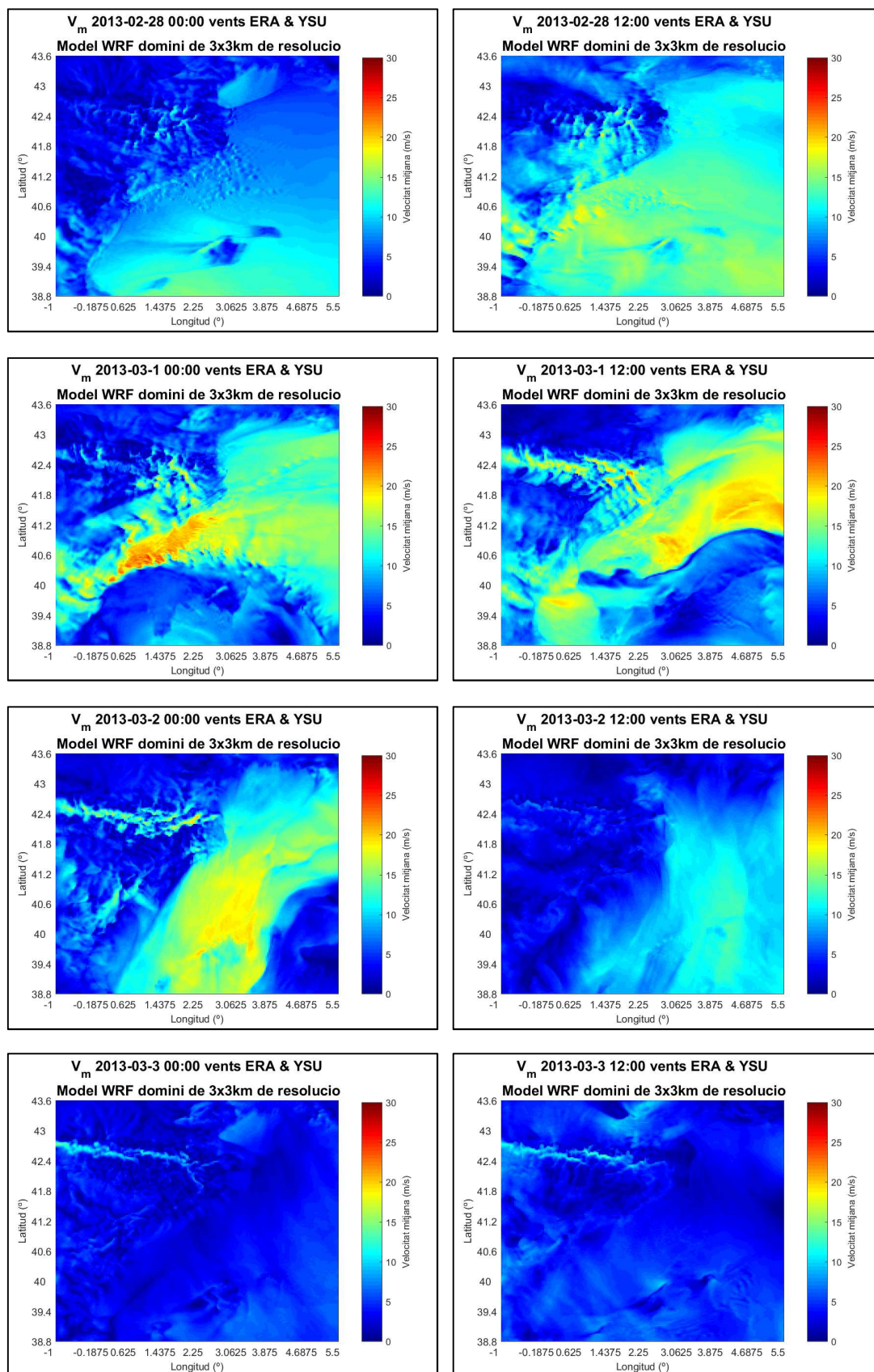


Figura 42: Mapa de la velocitat mitjana del vent a 10 m d'altura (barra de colors) cada 12h entre el 28 de febrer a les 00:00 i el 3 de març a les 00:00, per al domini de 3x3 km i la parametrització de la PBL segons "YSU" del model WRF forçat amb vents "ERA".

5.2. Resultats del model d'onatge

Abans d'exposar els resultats d'onatge cal esmentar que per a les localitzacions properes a la costa i, sobretot, per a dominis més grollers, el model SWAN no ha estat capaç de facilitar dades en les coordenades especificades. Això és degut a que en la discretització, les coordenades de l'estació corresponent podien trobar-se sobre un node corresponent a la costa i, per tant, que no pot donar informació sobre l'onatge.

En aquests casos i per a cada una de les variables d'interès s'ha considerat assignar un valor resultant a partir de la informació dels nodes adjacents. S'han estudiat diferents mètodes per a aquesta assignació: punt més proper, ponderació segons la distància, ponderació segons la batimetria i ponderació segons la batimetria relativa a la profunditat de la localització corresponent. A més, per a cada un d'aquests mètodes s'ha considerat la possibilitat d'incloure varis nodes en cada una de les direccions (fins a 10). Només s'han tingut en compte nodes amb dades, és a dir, situats sobre el mar.

De totes elles la ponderació per la batimetria amb els nodes immediatament adjacents és la que, en general, ha donat valors més propers a les mesures. Cal puntualitzar que aquesta ponderació s'ha realitzat tenint en compte només aquells nodes amb cotes batimètriques iguals o superiors a la del punt d'interès corresponent (obtinguda a partir de la informació de cada una de les boies/estacions). D'aquesta manera s'evita involucrar nodes molt allunyats del punt d'interès, o bé, nodes situats a profunditats molt petites i que hagin perdut la major part de l'energia en la zona de trencament de la onada.

Com ja s'ha comentat anteriorment, aquest model ha estat forçat amb les dades de vent provinents del model WRF i de AEMET.

Donat que per a cada una de les configuracions de camps de vent hi ha 8 configuracions dels dominis del model SWAN, exposar les sèries temporals de cada una d'elles i cada una de les variables representaria un excés d'informació per al lector. Per tant, s'ha decidit presentar la sèrie temporal de l'altura d'ona significant resultant del model SWAN forçat amb els camps de vent resultants de la configuració "ERA & YSU" del model meteorològic. La resta de sèries

temporals i les taules que recullen els paràmetres estadístics es recullen a l'annex 2, de resultats d'onatge.

5.2.1. Pont del Petroli

5.2.1.1. Altura d'ona significant

Si s'observa la Figura 45, es pot establir un mateix patró de comportament del model d'onatge per als diferents *inputs* de vent. Relacions de les configuracions del model SWAN a la Taula 6:

- Poca influència de l'*input* del contorn: les simulacions s'agrupen pel domini i camp de vent utilitzats, mostrant molt poca desviació entre l'ús de dades de contorn provinents de contorns amb vents de 9x9 km i les provinents de contorns amb vents de 3x3 km.
- Millores a l'augmentar la resolució: les simulacions s'apropen més a les mesures quan la resolució del domini i del camp de vents augmenten.
- Eficiència: tot i el que s'ha comentat en el punt anterior, cal esmentar que el domini de 3x3 km amb camps de vent de 3x3 km (acompanyat del contorn provinent del domini de 9x9 km) dóna els millors ajust (Figura 45), estalviant així costos computacionals i temporals.
- Desviació: en general, totes les configuracions obtenen valors del Pbias, és a dir el biaix, inferiors (en valor absolut) per als dominis grollers (Figura 43). Aquests són els que menys es desvien de mitjana (inferior al 20%), mentre que els dominis de major resolució espacial tendeixen a subpredir les mesures en un 50% de mitjana. La parametrització de la PBL segons MYJ genera menys desviació en els dominis grollers, mentre que en el domini de 1x1 km de resolució la PBL segons YSU és la que genera altures d'ona significant menys desviades.

En conjunt, les simulacions del model d'onatge que utilitzen camps de vents provinents del model WRF forçat amb *inputs* "EFIX" o "ERA", ambdues amb una PBL segons MYJ, són les que millor s'ajusten (coeficient de correlació de fins a 0.95) i menys es desvien de les mesures d'altura d'ona significant (aproximadament un 5% per a la configuració número 3 del model d'onatge).

Amb aquests camps de vent, la configuració del model SWAN amb domini espacial i camp de vents, ambdós de 3x3 km de resolució, és la configuració del que millor s'aproxima a les mesures.

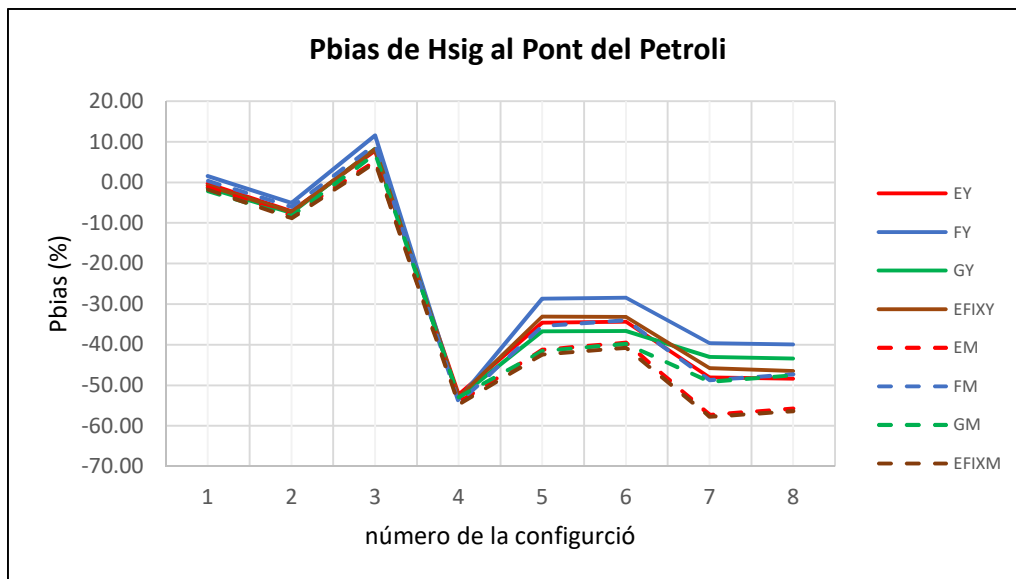


Figura 43: Evolució del Pbias l'altura d'ona significativa al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

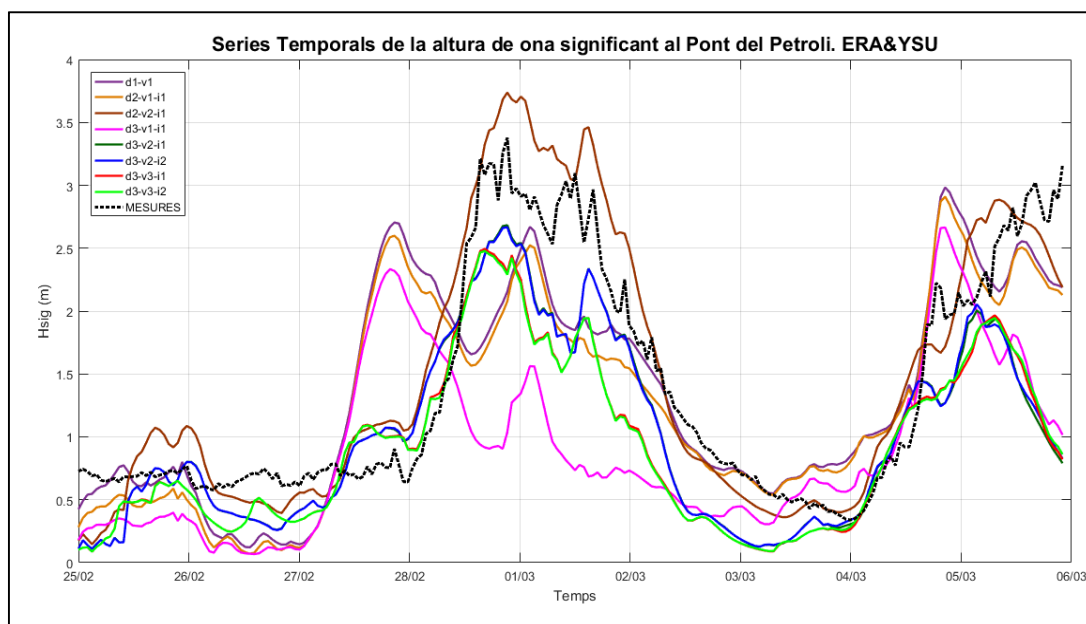


Figura 44: Sèries temporals de l'altura d'ona significativa, en les diferents configuracions del model SWAN, al Pont del Petroli per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.

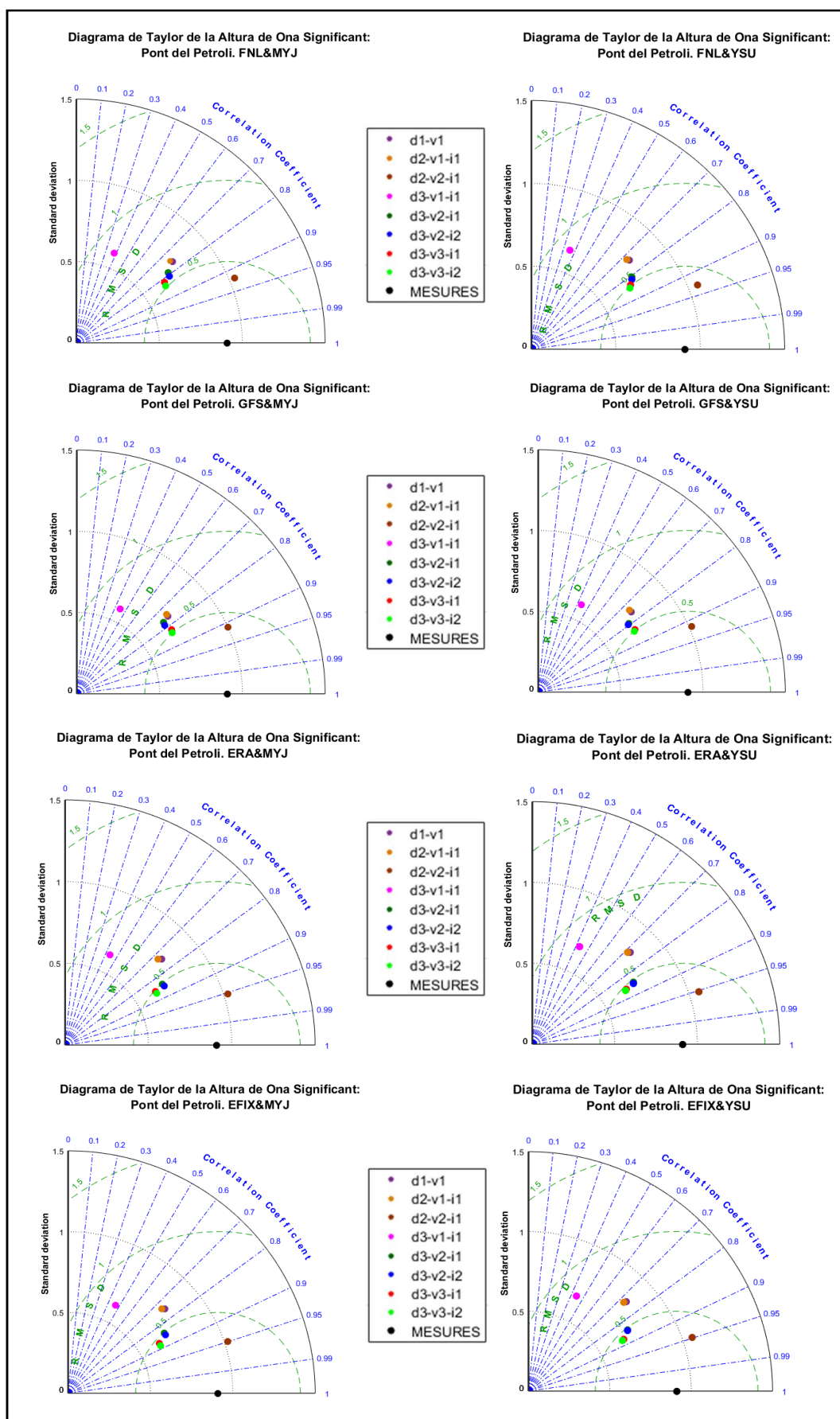


Figura 45: Diagrames de Taylor de l'altura d'ona significant al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

Si s'observa la sèrie temporal de l'altura d'ona significant per al camp de vent òptim del model meteorològic "ERA & YSU" (Figura 44), es pot veure com les configuracions que utilitzen camps de vent de baixa resolució no representen bé la tempesta del present estudi. Per altra banda, a l'augmentar la resolució del domini i de les dades d'entrada el que s'observa és una millor capacitat per representar els extrems locals, però augmentant la desviació respecte les mesures i avançant l'arribada del pic de la tempesta.

5.2.1.2. Període pic

En aquest cas, sembla ser que la tempesta va danyar l'aparell de mesura, o bé ha hagut algun problema de transmissió o enregistrament de les dades, ja que els valors mesurats queden molt per sota de qualsevol dels simulats (Figura 46). Segons la dinàmica mitjana de la zona, en un 85% dels casos el valor del període de pic és superior als 4 s (*Clima medio de oleaje*, 2017). Si s'observa l'evolució del Pbias al llarg de totes les configuracions del model SWAN utilitzades (Figura 47) es pot comprovar quantitativament aquesta desviació, sempre superior al 65%.

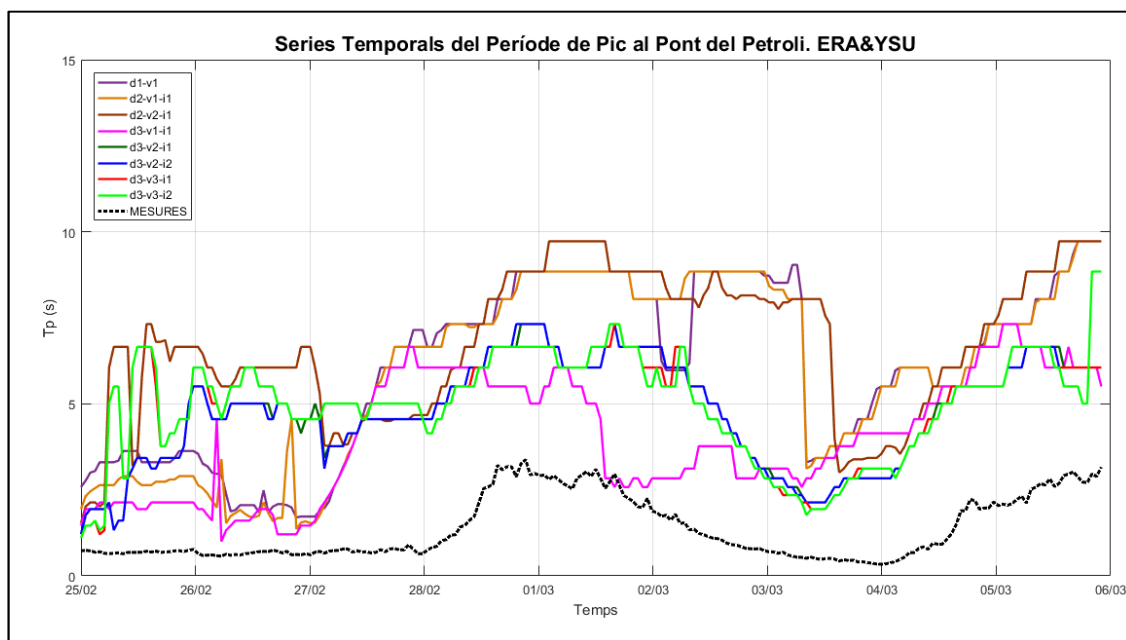


Figura 46: Sèries temporals del període de pic, en les diferents configuracions del model SWAN, al Pont del Petrolí per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.

Per a aquesta variable, els dominis que donen millors aproximacions a les mesures són els de resolució espacial d'1x1 km, en particular els que estan

forçats amb camps de vent de 3x3 km de resolució. Això es pot observar en els Diagrames de Taylor de cadascuna de les configuracions (Figura 48).

Si de totes maneres es comparen les simulacions amb les mesures, els camps de vent “EFIX” i “ERA” utilitzant una PBL segons la formulació “YSU” són els que faciliten els camps d'onatge més ajustats, amb valors del coeficient de correlació lleugerament per sobre del 0.8, mentre que la resta de configuracions obtenen valors per sota.

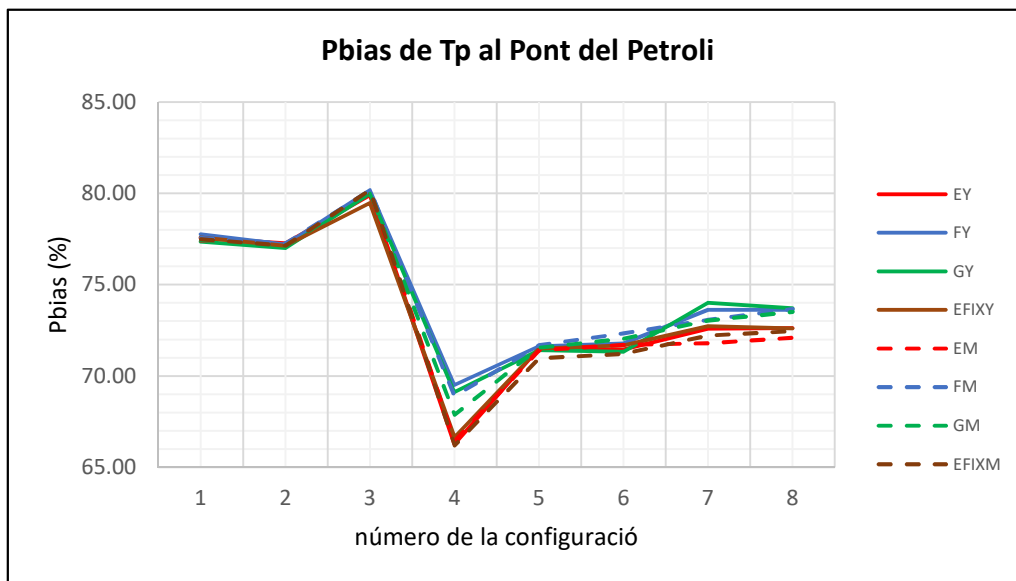


Figura 47: Evolució del Pbias del període de pic al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

No obstant, donat que sembla ser que les mesures no són de bona qualitat, aquestes valoracions poden no estar encertades i, per tant, es descartaran de l'anàlisi en una primera instància.

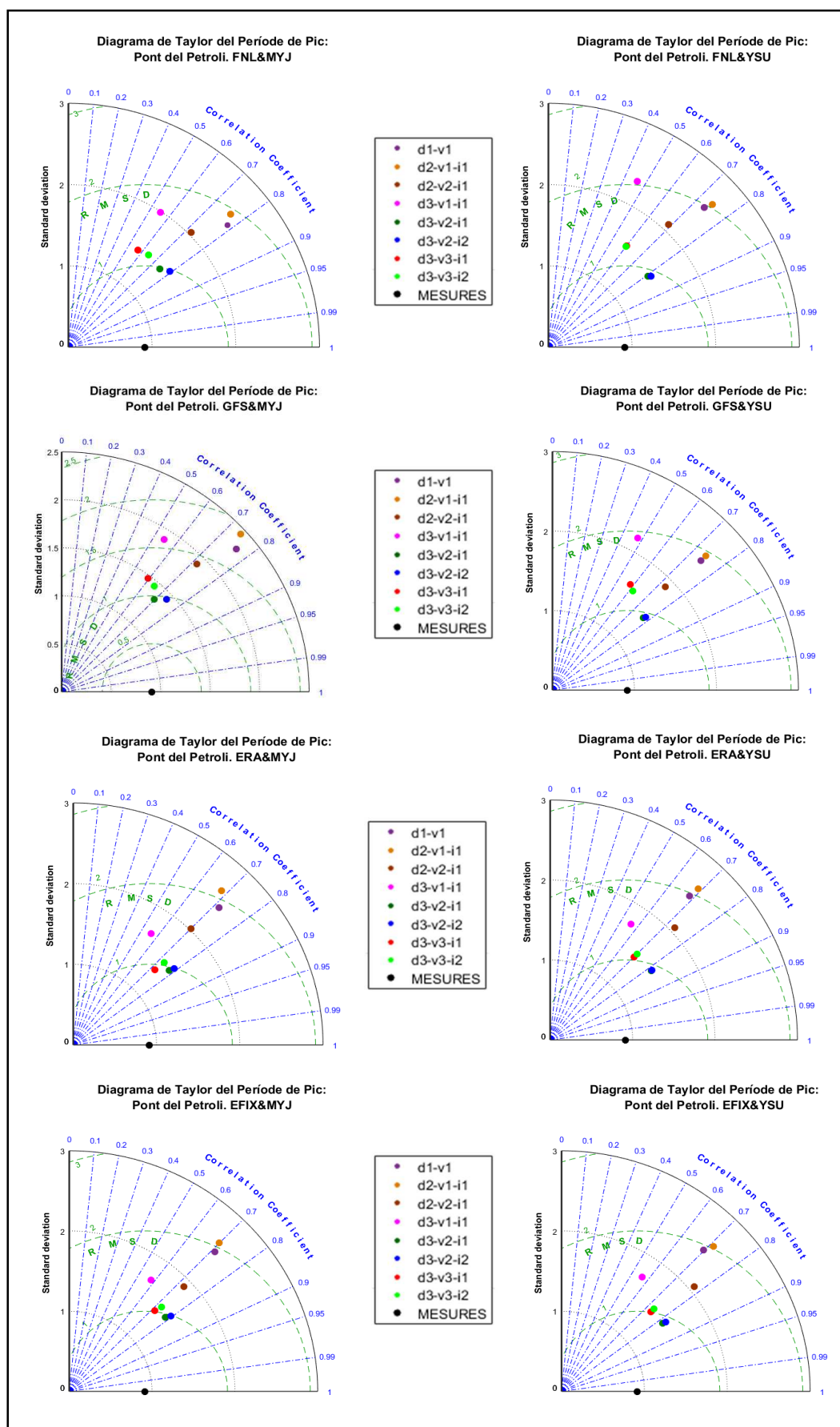


Figura 48: Diagrames de Taylor del període de pic al Pont del Petroli per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

5.2.2. Boia de Tarragona (REDEXT)

5.2.2.1. Altura d'ona significant

A la Boia Exterior de Tarragona, a mar obert, el model SWAN segueix un patró de comportament (Figura 51) semblant al presentat al Pont del Petrolí:

- Poca influència de l'input del contorn, tot i que en menor grau.
- Millores a l'augmentar la resolució del domini espacial i del camp de vents (assolint coeficients de correlació dal voltant del 0.9).
- Eficiència de la configuració de domini i camp de vents de 3x3 km de resolució, la qual dóna resultats igual de competitius que els de les configuracions de major resolució.
- Desviació: en aquest cas totes les configuracions del model d'onatge generen valors per sota, de mitjana, als mesurats a la boia (Figura 49), sobretot la simulació amb el camp de vents “GFS+SST & MYJ”, que dóna valors extremadament desviats. De totes elles, les que menys es desvien (al voltant del 10%) són les configuracions de major resolució (7 i 8) i camp de vent “FNL & YSU”, mentre que la resta ho fa entre un 20% i un 65%.

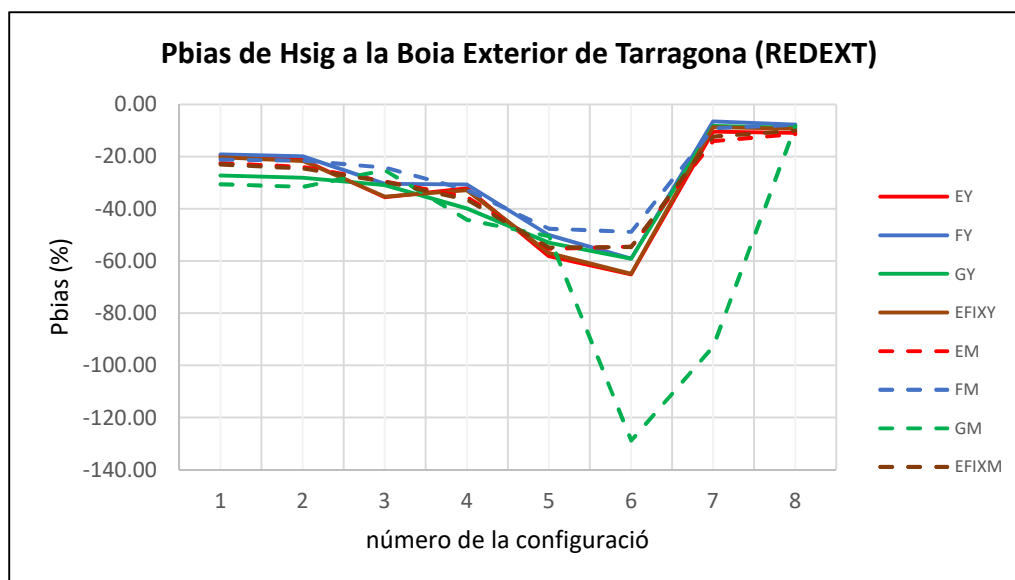


Figura 49: Evolució del Pbias de l'altura d'ona significant a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

En la Figura 50 es pot veure com, a diferència del que s'ha observat al Pont del Petroli, aquí, un augment de la resolució genera valors més propers a les mesures i un endarreriment del pic de la tempesta. Pel que fa als dominis de menor resolució, els resultats que generen segueixen estant molt allunyats dels valors mesurats.

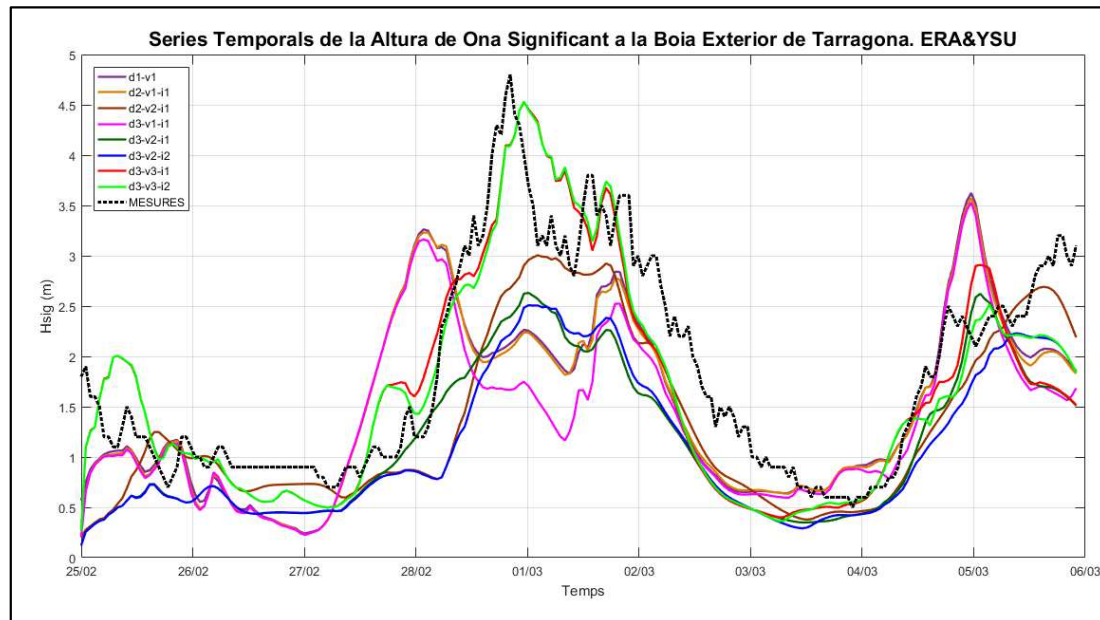


Figura 50: Sèries temporals de l'altura d'ona significant, en les diferents configuracions del model SWAN, a la boia exterior de Tarragona, per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.

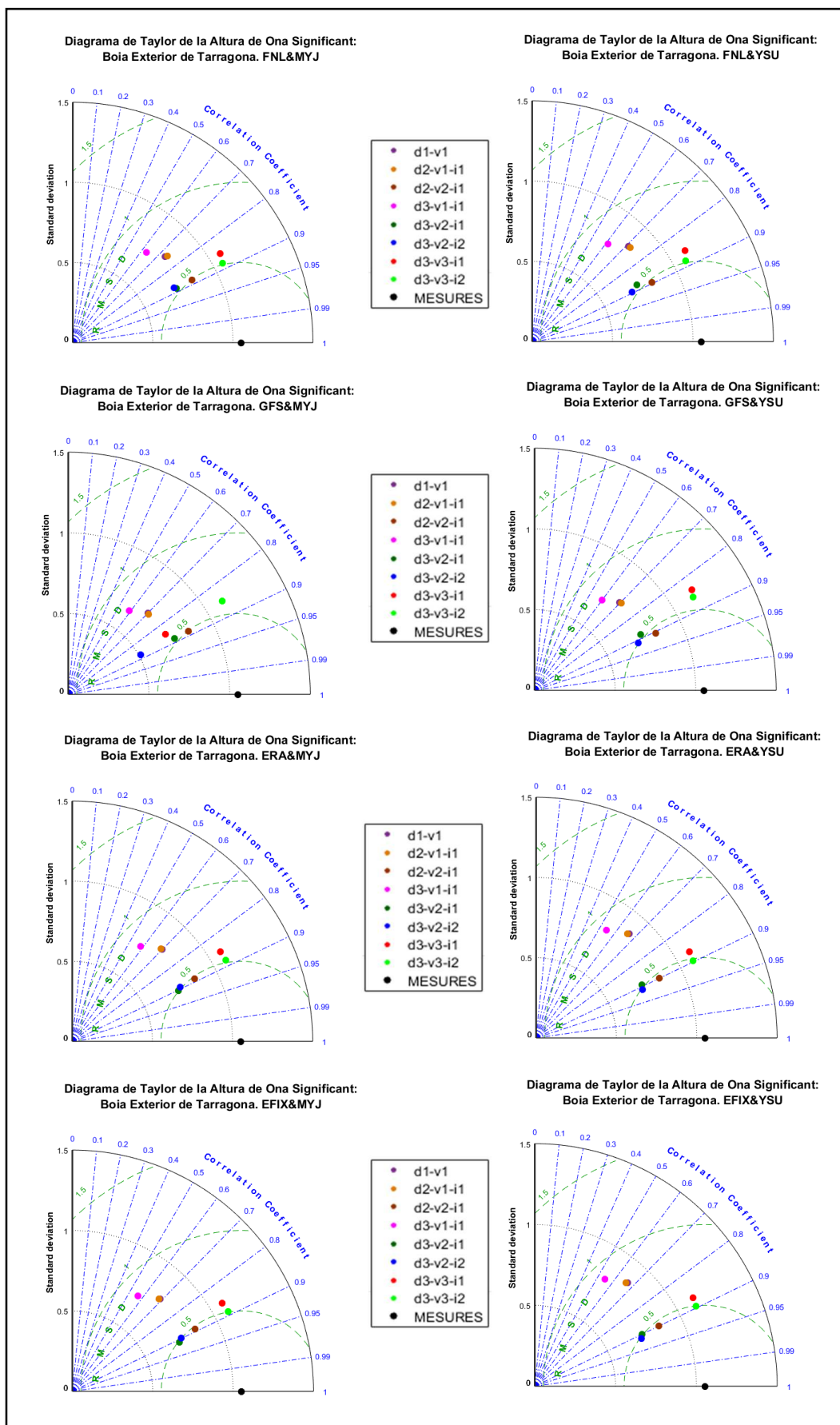


Figura 51: Diagrames de Taylor de l'altura d'ona significant a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

5.2.2.2. Període de Pic

En aquest cas de mar obert, totes les simulacions obtenen coeficients de correlació al voltant del 0.7 per a totes les configuracions del model SWAN excepte les que utilitzen camps de vent de 9x9 km de resolució (Figura 54). Entre aquestes simulacions més properes a les mesures no existeixen excessives diferències, si bé esmentar que per als camps de vent “FNL” i “GFS+SST” el domini espacial d’1x1 km de resolució forçat amb vents de també 1x1 km de resolució dóna millors aproximacions, mentre que pel camps de vent “ERA” i “EFIX” això ho fa el mateix domini espacial, però forçat amb vents de 3x3 km de resolució.

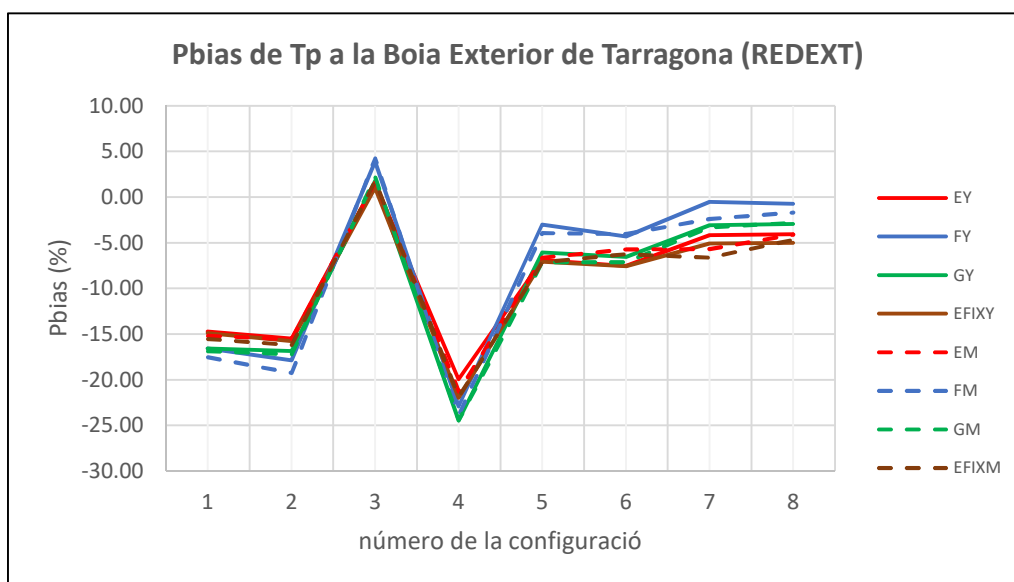


Figura 52: Evolució del Pbias del període de pic a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

En quant a la desviació, la configuració del model SWAN número 3 és la que menys es desvia (subpredint entre 1% i 5% per a tots els camps de vent) conjuntament amb les configuracions de major resolució dels seus paràmetres (especialment per al camp de vents “FNL & YSU”, que queda pràcticament a 0%). A diferència de la configuració 3, la resta de configuracions donen valors del període de pic sobrepredits respecte les mesures (Figura 52).

A la Figura 53 es presenta la sèrie temporal del període de pic quan el model SWAN ha estat forçat amb el camp de vents que ha resultat l’òptim del model meteorològic.

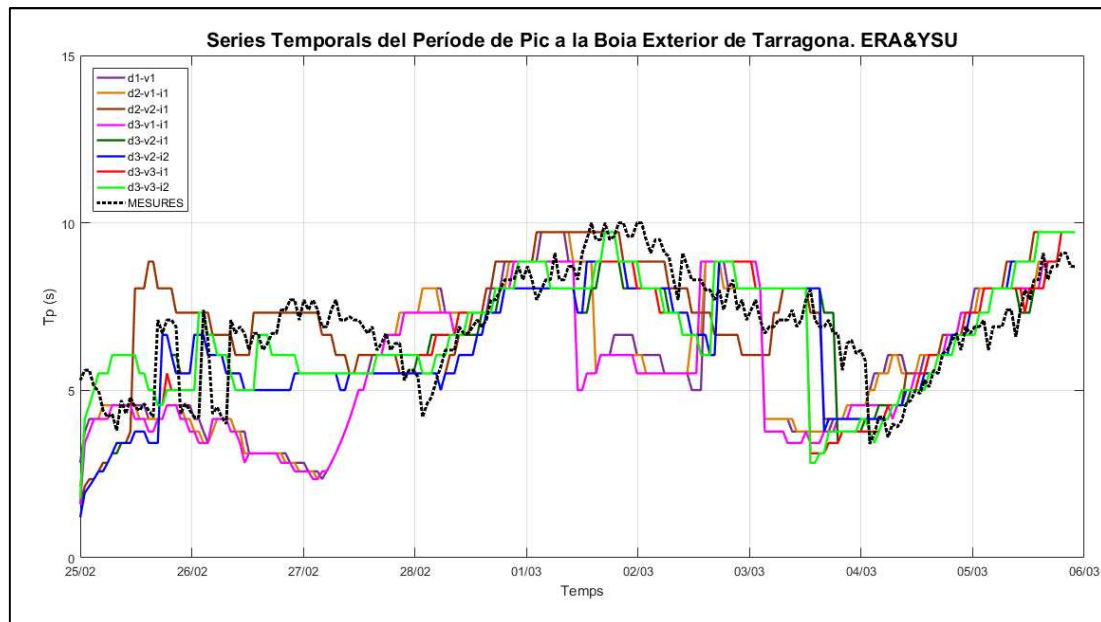


Figura 53: Sèries temporals del període de pic, en les diferents configuracions del model SWAN, a la boia exterior de Tarragona, per al camp de vents resultant de la configuració ERA & YSU del model WRF.

S'observa com les configuracions de menor resolució generen resultats que tenen un comportament quasi desfasat del de les mesures (no generen correlacions negatives, però sí molt baixes), únicament sembla que prediuen bé les pujades als pics de la tempesta. Les configuracions de major resolució tot i seguir bé la progressió de les mesures, en certs instants es desvien d'aquestes. En canvi, la configuració número 3 té un comportament més semblant al de les mesures.

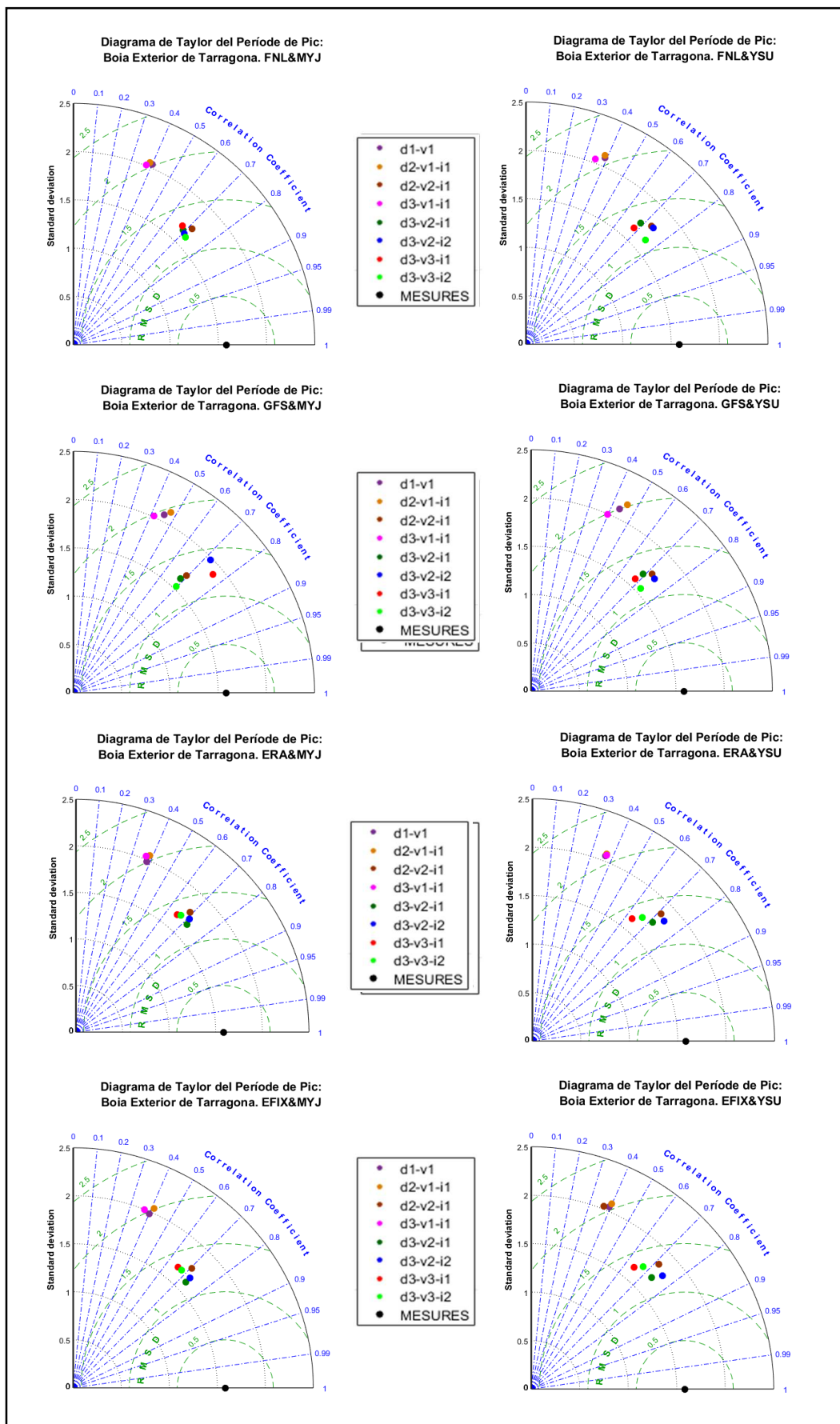


Figura 54: Diagrames de Taylor del període de pic a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

5.2.2.3. Direcció mitjana l'onatge

Per a la direcció mitjana de l'onatge hi ha dues configuracions del model SWAN que destaquen respecte les demés, assolint coeficients de correlació lleugerament superiors a 0.9 (Figura 56). Aquestes dues són les que utilitzen els camps de vent d'1x1 km de resolució, sense mostrar masses diferències entre la que utilitza els *inputs* del contorn de 9x9 km de resolució i la que utilitza els *inputs* del contorn de 3x3 km de resolució. La resta de configuracions del model d'onatge tendeixen a quedar a valors per sota, o molt per sota en alguns casos, al 0.7 del coeficient de correlació.

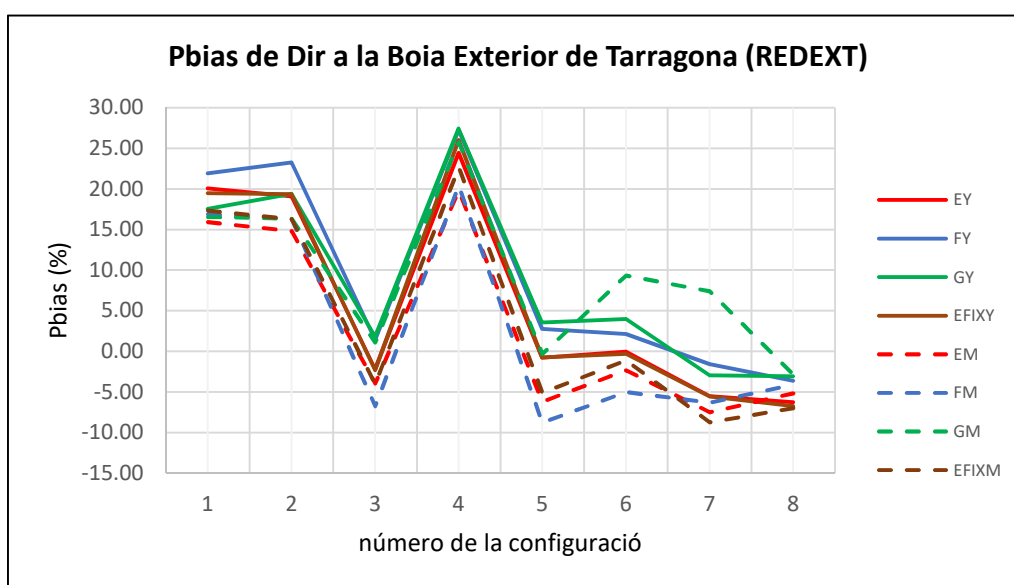


Figura 55: Evolució del Pbias de la direcció mitjana de l'onatge a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

Si ens fixem en les configuracions que més s'ajusten (la 7 i 8), la configuració del camp de vents que menys desviació genera és la "FNL" o la "(GFS+SST)" i una PBL de "YSU", amb sobreprediccions inferiors al 5% (Figura 55). D'altra banda, en la configuració número 3 del model SWAN la majoria de configuracions es desvien poc, les que utilitzen camps de vent "FNL" o "(GFS + SST)" tendeixen a desviar-se cap a la dreta (valors positius del Pbias) i les que utilitzen camps de vent "ERA" o "EFIX" es desvien cap a l'esquerra (valors negatius del Pbias). En general la parametrització segons "YSU" es desvia menys, excepte quan s'utilitza el camp de vents "(GFS + SST)".

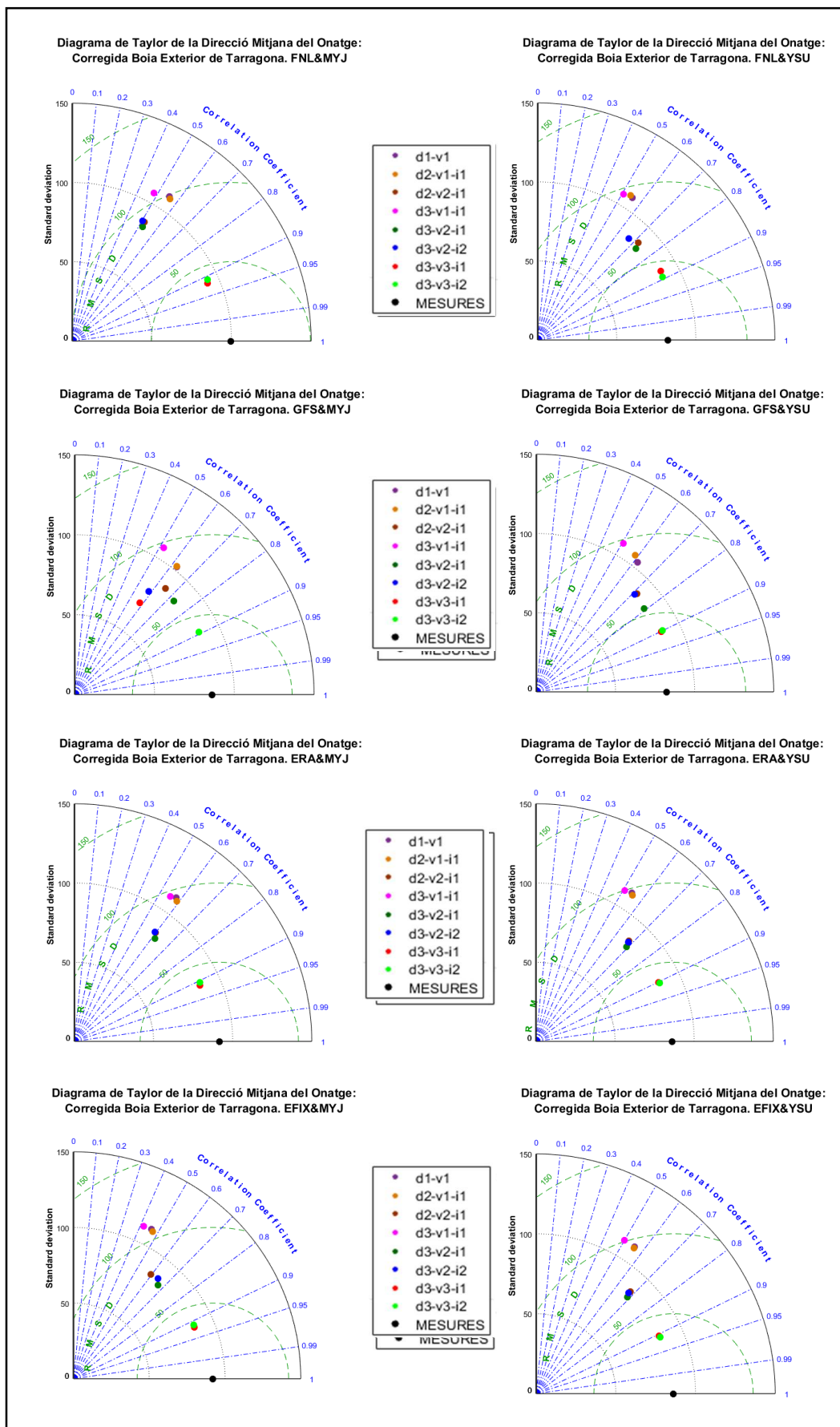


Figura 56: Diagrames de Taylor de la direcció mitjana de l'onatge a la boia exterior de Tarragona per a cada una de les configuracions del model SWAN forçat amb camps de vent provinents de cada una de les configuracions del model WRF.

5.2.3. Configuració òptima del model SWAN

Observant els resultats d'onatge mostrats anteriorment, i els presentats en l'Annex 2, es pot comprovar que existeix certa variabilitat en relació al camp de vents a utilitzar per generar els millors resultats d'onatge. En general, les dades "EFIX" són les que millors resultats donen, mentre que la parametrització de la PBL té una influència menor, sent la formulació de MYJ la que més contribueix en la millor aproximació de l'onatge. No obstant, els camps de vent "FNL & YSU" també han donat valors, en general, ben ajustat i poc desviats.

Tot i que l'elecció del camp de vents òptim a considerar com a *input* del model SWAN ha mostrat certa dificultat, l'elecció de la configuració òptima dels dominis del model SWAN no ha estat així. Per a l'altura d'ona significant i el període de pic, la configuració número 3 (resolucions del domini espacial de 3x3 km, del camp de vents de 3x3 km i dels *inputs* del contorn de 9x9 km) és la que més s'ajusta i menys es desvia de les mesures. Lles configuracions de major resolució són les que millor han aproximat les direccions simulades a les mesurades.

Per tant, en conjunt, la configuració òptima del model SWAN, en quant a *inputs* utilitzats i configuració dels dominis utilitzada, per a la costa catalana és el domini de 3x3 km de resolució, forçat amb camps de vent de 3x3 km de resolució provinents de l'anidament de dades "EFIX" considerant una parametrització de la PBL segons MYJ.

Les sèries temporals, diagrames de Taylor i taules amb informació dels paràmetres estadístics de les variables d'onatge d'aquesta configuració òptima i de les demés configuracions, de cada una de les boies, estan incloses en l'Annex 2 d'aquesta tesina.

Com a mostra gràfica, a la següent imatge (Figura 57) es mostren els mapes de l'altura d'ona significant per a la configuració òptima en diferents instants de temps. Es pot observar com la tempesta s'inicia al vespre del dia 28 de febrer i prové del NE-E, impactant principalment a les costes gironina i barcelonina i arribant a mar obert davant la costa de Tarragona, però amb menors altures d'ona significant.

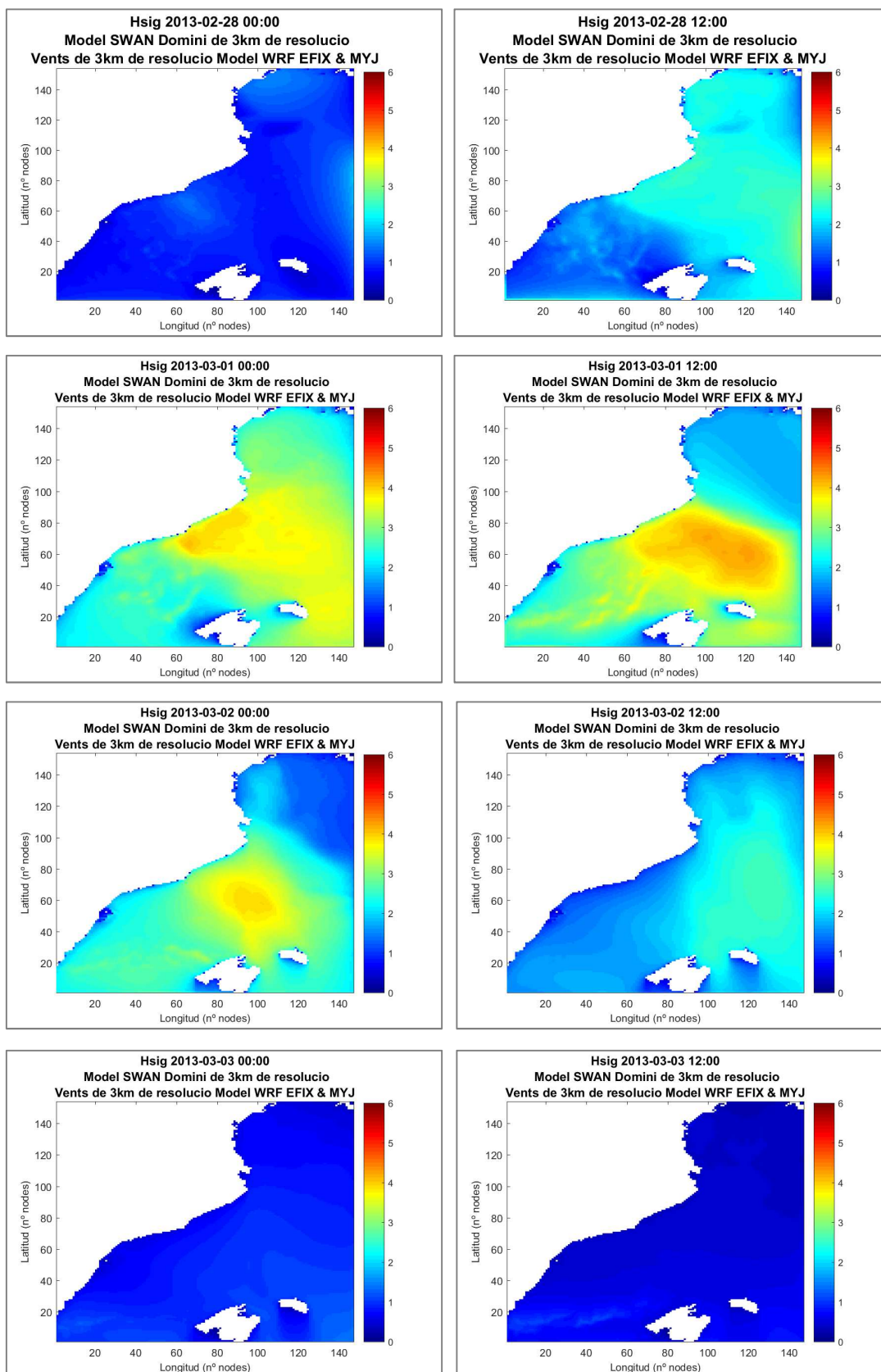


Figura 57: Mapa de l'altura d'ona significant (barra de colors) cada 12h entre el 28 de febrer a les 00:00 i el 3 de març a les 00:00, per a la configuració 3 del model SWAN per a camps de vent EFIX & MYJ del WRF (configuració òptima).

6. Discussió

Analitzant diferents configuracions del model WRF i realitzant un anidament a partir de models globals, en general, el model tendeix a generar valors sobrepredits de la velocitat mitjana del vent, mentre que la direcció es simula amb poca desviació i millorant (sobretot en els dominis de major resolució), en alguns casos, els resultats d'AEMET. És lògic observar que a l'augmentar la resolució del domini de càlcul i dels inputs de vent es captin millor les variacions dels camps de vent, ja que el model s'adapta millor a la zona d'estudi sense perdre tanta informació en les interpolacions de les variables. En la mateixa línia, amb l'anidament dels dominis utilitzant camps de vents d'alta resolució s'aconsegueix representar millor les direccions principals del vent.

Analitzant els resultats del model WRF a zones costaneres (Pont del Petroli) i a mar obert (Boia Exterior de Tarragona), presentades en anteriors apartats, i a la resta d'estacions meteorològiques (Annexes 1 i 2), es pot concloure que l'anidament dels dominis en model meteorològic ARW (fins a resolucions d'1x1 km), a partir de dades provinents de models globals (resolucions d'entre 50 i 100 km), genera millores en la predicció dels camps de vent. Tot i que entre els dominis de resolució 3x3 km i 1x1 km, aquests millores són bastant menys significatives. En conjunt, la majoria de simulacions generen valors sobrepredits de la velocitat mitjana a 10 m d'altura. De forma qualitativa, es pot veure com en el pic de la tempesta els models aproximen millor les direccions del vent, en general direccions de NE, mentre que a velocitats petites les direccions es prediuen pitjor, inclús no capturant direccions freqüents (en quant a mesures observades).

Abans de discutir els resultats de l'onatge, cal fer un comentari sobre la forma de les sèries temporals del període de pic. Com ja s'ha comentat en el capítol d'Estat de l'Art, el model SWAN treballa amb espectres d'energia, els quals depenen de la freqüència. Com que s'utilitzen particions d'aquestes, les gràfiques resultants seran discretes i no continues. Per al període de pic, el model escull aquella freqüència relacionada amb la màxima energia i, per tant, donarà algun dels valors de freqüència/període considerats en les particions. No obstant, donat que

l'altura d'ona significant és el valor mitjà del terç de majors valors, no produeix aquests esglaons.

En quant als resultats de l'onatge, en general, l'altura d'ona significant es subpredeix, sobretot per als dominis de major resolució. Per altra banda, a diferència de la direcció mitjana del vent, la direcció de l'onatge es simula amb més dificultats (amb la majoria de coeficients de correlació inferiors a 0.6, tot i la reduïda desviació respecte les mesures). En quant al període de pic, la configuració número 3 del model SWAN és la que millors resultats dona (coeficient de correlació de 0.7 i menor desviació), mentre que la resta es queden amb valors del coeficient de correlació inferiors a 0.7 i desviacions majors.

El fet que, tot i tenir valors de la velocitat del vent superiors als reals (és a dir, més energètics), es simulin valors subestimats de l'altura d'ona significant, és un fet molt comú a l'hora de predir l'onatge, sobretot en mars amb *fetchs* limitats i de batimetria complexa (Akpınar et al. (2012); Lin et al. (2002); Alari et al. (2008)).

Comparant la localització dels punts amb els que es comparen les simulacions, en general a mar obert es prediuen millor el període de pic (T_p) i la direcció de l'onatge (Dir), mentre que l'altura d'ona significant es prediu amb menys desviació, però amb valors del coeficient de correlació inferiors als de les localitzacions de la costa. Això és degut a que a mar obert, la influència de la costa és molt reduïda i, per tant, s'introdueix menys incertesa en el model.

Centrant l'atenció en l'altura d'ona significant (H_{sig}) i el període de pic (T_p), les quals són les variable més importants per ser les que més afecten a la transformació de l'ona en energia, hi ha diferències depenent la zona que s'està analitzant. A la costa de Barcelona, la millor configuració del domini SWAN per a l'altura d'ona significant és la configuració número 3 (domini i camp de vent de 3x3 km de resolució i *input* del contorn de 9x9 km), mentre que a la zona de Tarragona ho és la de major resolució (domini espacial i camps de vent d'1x1 km i *input* del contorn de 3x3 km). Per altra banda, a les zones costaneres (tant de Barcelona com de Tarragona) la millor configuració del model SWAN és la 3. A mar obert, la millor configuració depèn del camp de vent utilitzat: per als camps de vent "FNL" o "GFS" és millor la configuració de major resolució, mentre que per als camps de vent "ERA" i "EFIX" ho és la configuració 5.

Per tant, com aquest estudi es centra a la costa central catalana i és considera que la seva major utilitat recau en l'anàlisi dels impactes a la costa, es considerarà la configuració número 3 com la configuració òptima del model SWAN.

En aquest cas, la configuració del model meteorològic que millors resultats d'onatge ha generat és la "EFIX & MYJ". Els resultats a l'utilitzar la configuració de la PBL "YSU" o "MYJ" no varien massa en quant a coeficient de correlació, però quan es mira la desviació, la configuració "MYJ" sempre dona valors del Pbias més propers a 0.

Cal remarcar que el camp de vent "GFS & MYJ" pateix una desviació molt gran de l'altura d'ona significant en la configuració del model SWAN número 6 i que el model ha mostrat poca sensibilitat enfront els *inputs* del contorn provinents de l'anidament. És a dir, que l'anidament serveix per a augmentar la resolució del domini, però redueix aquesta utilitat quan es tracta de determinar quina resolució del *input* del contorn, provinent del niu 'pare' corresponent, és més eficaç.

7. Conclusions i treballs futurs

Un cop realitzat l'anàlisi de les variables meteorològiques més importants, a l'hora de generar onatge, i de les variables que defineixen aquest onatge, per a la tempesta succeïda a la costa catalana entre els dies 25 de febrer de 2013 i 6 de març del mateix any, s'ha observat que el comportaments dels models, tant meteorològic com d'onatge, són diferents depenen de la localització on es comparen resultats amb mesures.

A partir de diferents models meteorològics globals i de diferents configuracions de la *Planetary Boundary Layer* (PBL), amb la qual es modela la turbulència vertical, s'ha forçat el model WRF per a generar camps de vent a diferents resolucions (des de 27x27 km fins a 1x1 km de grandària del elements de la malla) utilitzant el Mètode dels Anidaments. D'aquest procés en resulta la conclusió de que, en general, l'augment de la resolució genera millores en la predicció dels camps de vent, tot i que a l'augmentar aquesta de 3x3 a 1x1 km, aquestes millores esdevenen poc significatives, inclús es pot donar el cas que no aportin millores en la predicció. No obstant, la direcció mitjana de procedència del vent sí que nota millores més importants quan s'utilitzen camps i dominis de major resolució, sobretot quan s'utilitza la parametrització de la PBL segons MYJ.

De tots els camps de vent utilitzats, aquell que ha generat valors que, en general, millor es correlacionen amb les mesures i que pateixen menys desviació respecte aquestes ha estat el resultant d'una configuració del model WRF que utilitza els *inputs* "ERA-Interim" i una configuració de la PBL segons la formulació "YSU".

Per altra banda, S'han utilitzat aquests camps de vent resultants del model WRF per forçar el model d'onatge SWAN. La calibració d'aquest segon model ha estat basada en la configuració dels seus dominis i dels *inputs* (de les resolucions de cada un), ja que la configuració dels altres paràmetres ha estat la configuració més contrastada en la costa catalana. Un cop forçat el model d'onatge amb tots els camps de vent resultants del model meteorològic, s'ha observat que, en conjunt, la configuració òptima és aquella que estableix un domini espacial d'1x1 km de resolució i que utilitza camps de vent de 3x3 km de resolució i *inputs* del

contorn (provinents de l'anidament) de 9x9 km de resolució. No obstant, el model és poc sensible a aquest últim paràmetre

S'ha pogut observar com, en costes complexes que disposen d'un fetch limitat (com és el cas de la costa catalana), la configuració òptima del model meteorològic, en quant a *inputs* provinents d'un model global i parametrització de la turbulència vertical (a partir de la PBL), no té perquè donar els camps de vent que generin l'onatge més aproximat a les mesures.

Un punt feble d'aquesta tesina és la falta de mesures amb les que comparar el resultat. Aquestes mesures haurien de provenir de més punts de mesura, però sobretot de l'anàlisi d'altres episodis de tempesta. Analitzar diferents períodes permetria comparar les simulacions amb un conjunt més ampli que inclogués la major quantitat de situacions possibles i així realitzar un anàlisi més realista dels processos en l'àrea d'estudi.

Per altre banda, les línies d'investigació que haurien d'ajudar a tenir una visió més completa de la interacció entre els camps de vent i els onatges que genera serien: incloure en les equacions de govern processos físics que agafen rellevància en les zones costaneres (com són les interaccions no lineals tríades o el trencament per *shoaling*) o realitzar una anàlisi seguint la Teoria dels conjunts (*ensembles*) per a introduir factors probabilístics que donin una visió més precisa de la realitat (captant pertorbacions i variacions dels valors mitjos).

8. Bibliografia

- Akpinar, A, G van Vledder, M Komurcu, and M Ozger (2012), "Evaluation of the numerical wave model (swan) for wave simulation in the black sea." *Continental Shelf Research*, 50, 80-99.
- Alari, V, U Raudsepp, and T Koutsr (2008), "Wind wave measurements and modelling in k dema bay, estonian archipelago sea." *Journal of Marine Systems*, 74, 530-540.
- Andrews, Gregory R. (2000)., "Foundations of Multithreaded, Parallel, and Distributed Programming", p. 8-9, 291. Addison-Wesley, ISBN 0-201-35752-6.
- Arakawa, A., V.R. Lamb (1977). "Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA general circulation model". *Methods of Computational Physics*. **17**. New York: Academic Press. pp. 173-265.
- Ardhuin, F., L. Bertotti, R.-R. Bidlot, L. Cavaleri, V. Filipetto, J.-M. Lefevre, and P. Wittmann (2007). "Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. Ocean Engineering", 34, 526-541.
- Ardhuin, F and A Roland (2013), "The development of spectral wave modes: coastal and coupled aspects." *Coastal Dynamics*, 4, 833-846.
- Arnau, P (2000). "Aspectos de la variabilidad de mesoescala de la circulación marina en la plataforma continental catalana". Tesis Doctoral, Universitat Polit cnica de Catalunya.
- "ARW version 3 Modelling System User's Guide" (2016). Mesoscale & Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research (NCAR), USA.
- Baldasano, J.M., Cremades, L., Soriano, C., (1994). "Circulation of air pollutants over the Barcelona geographical area in summer". *Proceedings of Sixth European Symposium Physic-Chemical Behaviour of Atmospheric Pollutants*. Varese, Italy, 18-22 October. Report EUR 15609/1 EN: 474-479.
- Bertotti, L., J.-R. Bidlot, C.Bunney, L.Cavaleri, L. D. Passeri, M. Gomez, J.-M. Lefevre, T. Paccagnella, L. Torrisi, A. Valentini and A. Vocin (2011). "Performance of different forecast systems in an exceptional storm in the western mediterranean sea", *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 138, 34-55.
- Bertotti, L., L.Cavaleri, A.Soret, R.Tolosana-Delgado (2014). "Performance of global and regional nested meteorological models", *Continental Shelf Research*: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.12.013>
- Bolaños, R., A. Sánchez-Arcilla, J. Gomez, J. Cateura and A. Sairouni (2004). "Limits of operational wave prediction in the North-western Mediterranean". *International Conference on Coastal Engineering*, Lisboa, Portugal. September.

- Bolaños, R., A. Sánchez-Arcilla (2006). A note on nearshore wave features. Implications for wave generation. *Progress in Oceanography* 70, 168–180.
- Bolaños, R., G. Jorda, J. Cateura, J. Lopez, J. Puigdefabregas, J. Gomez, and M. Espino (2009), "The xiom: 20 years of a regional coastal observatory in the spanish catalan coast." *Journal of Marine Systems*, 77, 237-230.
- Bolaños, R, P Osuna, J Wolf, and A Sanchez-Arcilla (2011), "Development of the polcoms-wam current-wave model." *Ocean Modelling*, 36, 102{115.
- Booij, N., , R.C. Ris and L.H. Holthuijsen (1999). "A third-generation wave model for coastal regions. I- Model description and validation". *Journal of geophysical research* [en línia]. Vol. 104, no. C4, p. 7649-7666. ISSN 0148-0227. DOI: [10.1029/98jc02622](https://doi.org/10.1029/98jc02622). Disponible a: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98JC02622/epdf>
- BSC-CNS (2012). "*Imatge del sistema MareNostrum III*". Consultada al Juny de 2017. Disponible a: <https://www.bsc.es/sites/default/files/public/BSC001.jpg>
- Bricheno, L., A. Soret, J. Wolf, O. Jorba, and J. Baldasano (2013) "Effect of High-resolution meteorological forcing on nearshore wave and current model performance". *J. Atmos. Oceanic Technol.* DOI: [10.1175/JTECH-D-12-00087.1](https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00087.1), in press.
- Browning, K. A. (2004). "The sting at the end of the tail: Damaging winds associated with extratropical cyclones", *Quart. J. Royal Met. Soc.*, 130, 37–399.
- Bukovsky, M. S. and D. J. Karoly (2000). "Precipitation simulations using WRF as a nested regional climate model". *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 48, 2152–2159.
- Caldwell, P., H. S. Chin, D. C. Bader, and B. G. (2009). "Evaluation of a WRF dynamical downscaling simulation over California", *Climatic Change*, 95, 499–521.
- Cavaleri, L. y Rizzoli, P.M. (1981). "Wind wave prediction in shallow water: Theory and Applications", *Journal of Geophysical Research: Oceans* [en línia]. Vol. 86, no. C11, p. 10961-10973. ISSN 2156-2202. DOI: [10.1029/JC086iC11p10961](https://doi.org/10.1029/JC086iC11p10961). Disponible a: <http://dx.doi.org/10.1029/JC086iC11p10961>.
- Cavaleri, L. (2009). "Wave modeling – missing the peaks", *J. Phys. Oceanogr.*, 39, 2757–2778.
- Clima medio de oleaje. Boya de Barcelona II, conjunto de datos: Red Costera. Banco de datos oceanográficos de Puertos del Estado. Descarregat al maig de 2017. Disponible a: www.puertos.es
- Dolev, Shlomi (2000). "Self-Stabilization", p. 5. *MIT Press*, ISBN 0-262-04178-2.
- Escríche, E. (7 de Març del 2013). "*Crescudada de rius i platges tancades pel temporal*", disponible a: http://www.ara.cat/societat/Crescudada-rius-platges-tancades-temporal_0_878312234.html

- Floors, R., E. Batchvarova, S. Gryning, A. N. Hahmann, A. Pena, and T. Mikkelsen (2011). "Atmospheric boundary layer wind profile at a flat coastal site – wind speed lidar measurements and mesoscale modeling results", *Adv. Sci. Res.*, 6, 155–159.
- García, M.A., Sánchez-Arcilla, A., Sierra, J.P., Sospedra, J., Gómez, J. (1993). "Wind Waves Off the Ebro Delta, NW Mediterranean". *Journal of Marine System*, vol. 4. Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, pp. 235–262.
- Garcia, A., Torres, J. (23 d'octubre de 2016). "Badalona cobrará más por los anuncios en el Pont del Petrolí y el paseo Marítimo", disponible a: <http://www.lavanguardia.com/local/barcelones-nord/20161023/411157364679/badalona-cobrara-anuncios-pont-petrolí-paseo-maritimo.html>
- Ghosh, Sukumar (2007). "Distributed Systems – An Algorithmic Approach", p. 3-8. Chapman & Hall/CRC, ISBN 978-1-58488-564-1.
- Haltiner, G. J., and R. T. Williams (1980). "Numerical prediction and dynamic meteorology". John Wiley & Sons, Inc., 477pp.
- Hasselmann, K (1960), "Grundgleichungen der seegangsvoraussage." *Schiffstechnik*, 7, 191-195.
- Hasselmann, K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)", *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12, A8.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J.H. Allender and T.P. Barnett (1985). "Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity wave spectrum. Part II: Parameterizations of the nonlinear transfer for application in wave models", *J. Phys. Oceanogr.*, 15, 11, 1378-1391
- Hodur, R. M. (1997). "The Naval Research Laboratory's coupled ocean/atmosphere mesoscale prediction system (COAMPS)". *Monthly Weather Rev.*, 125, 1414–1430.
- Holthuijsen, L and S DeBoer (1988), "Wave forecasting for moving and stationary targets", volume 387 pp. Cambridge University Press.
- Holthuijsen, L.H. (2007). "Waves in oceanic and coastal waters", *Cambridge University Press*.
- Hong, S.-Y., and H.-L. Pan (1996). "Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model", *Mon. Wea. Rev.*, 124, 2322–2339.
- Hong, S.-Y., and Y. Noh, and J. Dudhia (2006). "A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes". *Mon. Wea. Rev.*, 134, 2318–2341.

- Janjic, Z. I. (1990). "The step-mountain coordinate: physical Package", *Mon. Wea. Rev.*, 118, 1429–1443.
- Janjic, Z. I. (1996). "The surface layer in the NCEP Eta Model", *Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19–23 August; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA*, 354–355.
- Janjic, Z. I. (2002). "Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model", *NCEP Office Note*, No. 437, 61 pp.
- Jimenez, J.A., Sanchez-Arcilla, A., Valdemoro, H.I., Gracia, V., Nieto, F. (1997). "Processes reshaping the Ebro delta". *Marine Geology* 144, 59–79.
- Jiménez, J.A. (2016). "*Coastal protection. COASTAL SYSTEM BASICS*", [diapositives]. Ingeniería y gestión costera. Barcelona: Laboratori d'Enginyeria Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya. 44 diapositives.
- Jorba, O., Perez, C., Rocadenbosch, F., Baldasano, J.M. (2004). "*Cluster Analysis of 4 day back trajectories arriving in the Barcelona area, Spain, from 1997 to 2002*", *Journal of Applied Meteorology* 43, 887–901.
- Jorba, O., T. Loridan, P. Jimenez-Guerrero, and J. M. Baldasano (2008) "Annual evaluation of WRF-ARW and WRF-NMM meteorological simulations over Europe. Abstract", *9th Annual WRF Users' Workshop*, 15.
- Kahma, K.K. and C.J. Calkoen (1992). "Reconciling discrepancies in the observed growth of wind-generated waves", *J. Phys. Oceanogr.*, 22, 1389–1405.
- Kamphuis, William (2010). "Introduction to Coastal Engineering and Management", *Advanced Series on Ocean Engineering* – Vol. 30, 2nd Edition.
- Komen, G.J., S. Hasselmann, and K. Hasselmann (1984). "On the existence of a fully developed wind-sea spectrum", *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 1271–1285.
- Laprise R. (1992). "The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as independent variable", *Mon. Wea. Rev.*, 120, 197–207.
- Lin, W, L Sanford, and S Suttles (2002), "*Wave measurement and modelling in chesapeake bay*." *Continental Shelf Research*, 22, 2673–2686.
- Lynch, Nancy A. (1996). "Distributed Algorithms", p. 2-3, xix, 1-2. Morgan Kaufmann, ISBN 1-55860-348-4.
- "Mare Nostrum III User's Guide" (2015). Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación, Barcelona, Spain.
- Martín-Vide, J., Olcina, J. (2001). "Climas y tiempos de España". Ed. Alianza, Madrid, 258 pp

- Mass, C. F., D. Owens, K. Westrick, and B. A. Colle (2002). "Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, 406–430.
- Mendoza, T, J Jimenez, and J Mateo (2011). "A coastal storms intensity scale for the catalan sea (nw mediterranean)." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 2453-2462.
- Miles, J.W. (1957). "On the generation of surface waves by shear flows". *Journal of Fluid Mechanics* [en línia]. Cambridge University Press, Vol. 3, no. 02, p. 185. ISSN 0022-1120. DOI: [10.1017/S0022112057000567](https://doi.org/10.1017/S0022112057000567).
- Millán, M.M., Salvador, R., Mantilla, E. (1997). "Photooxidant dynamics in the Mediterranean basin in summer: Results from European research projects". *Journal of Geophysical Research*, 102, 8811-8823.
- Miyim (2009). "Distributed and parallel Systems". [Consultat al Desembre de 2017]. Disponible al: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Fitxer:Distributed-parallel.svg><https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Distributed-parallel.svg>.
- Ooyama K. V. (1990). "A thermodynamic foundation for modeling the moist atmosphere", *J. Atmos. Sci.*, 47, 2580–2593.
- Pallares, E. (2016). "High-resolution wave forecasting. The Catalan coast case. Modelling, coupling and validation". Dirigida per Sánchez-Arcilla, A i Espino, M. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
- Palmer, T.N., Buizza, R, Doubilas-Reyes, F, Jung, T, Leutbecker, M, Shutts, G.J, Steinheimer, M, Weisheimer, A. (2009). "Stochastic Parametrization and Model Uncertainty", T.M. 598. ECMWF, 42.
- Pasquill, F. (1961). "The estimation of the dispersion of windborne material", *The Meteorological Magazine*, vol 90, No. 1063, pp 33-49.
- Peleg, David (2000) "Distributed Computing: A Locality-Sensitive Approach", p. 1, 4, xv. SIAM, ISBN 0-89871-464-8.
- Pérez C, Sicard M, Jorba O, Comerón A, Baldasano JM. (2004). "Summertime re-circulations of air pollutants over the north-eastern Iberian coast observed from systematic EARLINET lidar measurements in Barcelona". *Atmospheric Environment*, 38, 3983-4000.
- Pierson, W.J. and L. Moskowitz (1964). "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii", *J. Geophys. Res.*, 69, 24, 5181-5190.
- Puertos del Estado – REDEXT, dades de la boia de Tarragona de l'any 2013. Petició de dades: 19 de setembre del 2016. url: <http://www.puertos.es/>
- Puertos del Estado – REDCOS, dades de la boia de Barcelona II de l'any 2013. Petició de dades: 19 de Setembre del 2016. url: <http://www.puertos.es/>

- Puertos del Estado – REDCOS, dades de la boia del port de Tarragona de l'any 2013. Petició de dades: 23 de novembre del 2016. url: <http://www.puertos.es/>
- Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. y Booij, N. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions: 2. Verification". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 104, no. C4, p. 7667. ISSN 0148-0227. DOI: [10.1029/1998JC900123](https://doi.org/10.1029/1998JC900123).
- Rogers, W.E., J.M. Kaihatu, L. Hsu, R.E. Jensen, J.D. Dykes and K.T. Holland (2007). "Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California Bight", *Coastal Engineering*, 54, 1-15.
- Sanchez-Arcilla, A, D Gonzalez-Marco, and R Bolaños (2008). "A review of wave climate and prediction along the spanish mediterranean coast." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 1217-1228.
- Seo, H., A. J. Miller, and J. O. Roads (2006). "The Scripps coupled ocean atmosphere regional (SCOAR) model, with applications in the Eastern Pacific sector", *J. Climate*, 20, 381–402.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, Duda, M., Huang, X., W. Wang and J. G. Powers (2008). "A description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR Technical Notes NCAR/TN-475+STR", *Mesoscale and Microscale Meteorology Division National Center for Atmospheric Research Boulder, Colorado, USA*.
- Soret, A. Jorba, O. Carrio, D. Baldasano, J.M. (2011). "Meteo-oceanographic modelling over the Catalan coast. Model development and implementation", *Field-AC Annual Meeting*, 6-7 June. Leuven, *Belgium*.
- Soriano, C., Baldasano, J.M., Buttler, W.T., Moore, K. (2001). "Circulatory patterns of air pollutants within the Barcelona air basin in a summertime situation: lidar and numerical approaches". *Bound.-Lay. Meteorol.*, 98, 33-55
- SWAN team [descarregat al 2016]. SWAN, "Scientific and technical documentation. SWAN Cycle III version 41.10". *Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geoscienc, Environmental Fluid Mechanics Section*. Delft, Netherlands.
- Taylor, K.E. (2001). "Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram", *Journal of Geophysical Research*. Vol. 106, no. D7, p. 7183-7192. ISSN 0148-0227. DOI: [10.1029/2000JD900719](https://doi.org/10.1029/2000JD900719).
- "Titani Cluster User Manual V.1.2" [descarregat al 2016]. CaminsTECH, Escola de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Espanya. url: <https://caminstech.upc.edu/ca/calculintensi.u>.
- Toll, I., Baldasano, J.M. (2000). "Modeling of photochemical air pollution in the Barcelona area with highly disaggregated anthropogenic and biogenic emissions". *Atmospheric Environment*, 34, 3060-3084.

Townsend, R. (27 de desembre de 2008). Disponible a:
<http://www.rtve.es/fotogalerias/temporal-costa-brava/20292/temporal-levante-costa-gerundense/5/>

WISE Group (2007). "Wave modelling - The state of the art". *Progr. Oceanogr.*, 75, 603-674.

Zijlema, M., G.Ph. van Vledder and L.H. Holthuijsen (2012). "Bottom friction and wind drag for wave models". *Coastal Engineering*, 65, 19-26

Altres referències:

Informació sobre la NAO: <http://www.ldeo.columbia.edu/NAO>

Informació sobre la PBL: <https://www.esrl.noaa.gov/research/themes/pbl/>